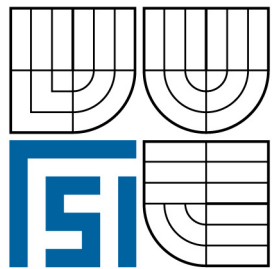


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

ROZMĚROVÁ PŘESNOST ODLITKŮ ZE SLITIN AL
VYRÁBĚNÝCH METODOU VYTAVITELNÉHO MODELU
DIMENSIONAL ACCURACY OF AL CASTINGS MANUFACTURED BY LOST WAX PROCESS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

TOMÁŠ KUČERA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. MILAN HORÁČEK CSc.

BRNO 2008

ABSTRAKT

Cílem diplomové práce bylo zjištění možností dosažení rozměrových tolerancí u jednotlivých fází zhotovení odlitků metodou vytavitelného modelu. Rozměrová přesnost vybraných voskových modelů a odlitků byla měřena posuvným měřidlem. Vybrané rozměry voskových modelů byly nejdříve měřeny ihned po vyjmutí z matečné formy a dále v průběhu 7 dní a u odlitků ihned po otryskání. Naměřené hodnoty byly statisticky vyhodnoceny. Z výsledků vyplývá, že rozsáhlý tlustostěnný voskový model se nemůže obalovat dříve než po 7 dnech stabilizace, protože rozměry voskového modelu nejsou stabilní.

Klíčová slova

Přesné lití, voskový model, rozměrová přesnost, odlitek

ABSTRACT

The aim of my diploma thesis was to find the possibilities of reaching the dimensional tolerance in the individual phases of casting by the investment casting process. The accuracy of the selected wax patterns and castings were measured by a caliper. At first the selected dimensions of the wax models were measured right after taking them out of the mold and then they were measured during seven days. The castings were measured after pouring. The obtained figures were statistically evaluated. The results show that the large-scale and thick-wall wax model should be coated after seven days of stabilization because the dimensions of the wax model are not stable.

Key words

Investment casting, wax pattern, dimensional accuracy, casting

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KUČERA, Tomáš. *Rozměrová přesnost odlitků ze slitin Al vyráběných metodou vytavitelného modelu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. s.83. Doc. Ing. Milan Horáček CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Rozměrová přesnost odlitků ze slitin Al vyráběných metodou vytavitelného modelu vypracoval(a) samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

5.5.2008

.....
Tomáš Kučera

Poděkování

Děkuji tímto doc. Ing. Milanu Horáčkovi, Csc. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat všem zaměstnancům firmy Fimes a.s. za spolupráci při realizaci praktické části.

OBSAH

Abstrakt	3
Prohlášení	4
Poděkování	5
Obsah	6
Úvod.....	8
1 TEORETICKÁ ČÁST	9
1.1 Definice přesného lití	9
1.2 Postup výroby odlitku technologií vytavitelného modelu	10
1.2.1 <i>Výroba matečné formy</i>	<i>10</i>
1.2.2 <i>Materiály pro výrobu matečné formy</i>	<i>10</i>
1.2.3 <i>Zhotovení voskového modelu</i>	<i>11</i>
1.2.4 <i>Sestavení voskových modelů</i>	<i>12</i>
1.2.5 <i>Obalování voskových modelů</i>	<i>13</i>
1.2.6 <i>Sušení obalů</i>	<i>13</i>
1.2.7 <i>Vytavování modelové hmoty</i>	<i>14</i>
1.2.8 <i>Žíhání skořepin</i>	<i>14</i>
1.2.9 <i>Odlévání.....</i>	<i>15</i>
1.2.10 <i>Apretace a kontrola odlitků</i>	<i>15</i>
1.3 Modelové hmoty	16
1.3.1 <i>Složení voskových směsí.....</i>	<i>17</i>
1.3.2 <i>Vlastnosti modelových hmot.....</i>	<i>18</i>
1.3.3 <i>Rozdělení a složení voskových směsí.....</i>	<i>20</i>
1.3.4 <i>Hlavní složky modelových vosků</i>	<i>21</i>
1.3.5 <i>Regenerace a rekonstituce voskových směsí</i>	<i>24</i>
1.4 Keramické formy	24
1.4.1 <i>Typy keramických forem</i>	<i>24</i>
1.4.2 <i>Plniva keramických hmot</i>	<i>25</i>
1.4.3 <i>Pojiva keramických hmot</i>	<i>27</i>
1.5 Rozměrové změny v průběhu technologie vytavitelného modelu ..	28
1.5.1 <i>Přesnost metody vytavitelného modelu</i>	<i>29</i>
1.5.2 <i>Rozbor rozměrových změn v průběhu technologie</i>	<i>31</i>

1.5.3 Shrnutí fází na přesnost metody vytavitelného modelu	35
2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	36
2.1 Cíle experimentů	36
2.2 Technologický postup výroby ve firmě Fimes a.s.	36
2.2.1 Výroba matečné formy	36
2.2.2 Příprava modelové směsi.....	37
2.2.3 Regenerace vosku	37
2.2.4 Zhotovení voskových modelů	38
2.2.5 Stabilizace voskových modelů	40
2.2.6 Hrotovení voskových modelů	40
2.2.7 Sestavení voskových modelů do stromečků	41
2.2.8 Obalování stromečků	41
2.2.9 Vytavování vosku	45
2.2.10 Žíhání skořepinových forem	46
2.2.11 Odlévání.....	46
2.2.12 Čištění odlitků	47
2.3 Metodika měření	47
2.3.1 Měřená součást	47
2.3.2 Rozměrové změny v průběhu technologie.....	50
2.3.3 Měřicí přístroje	50
2.4 Měření rozměrové přesnosti	51
2.4.1 Metodika výpočtu pravděpodobnostního intervalu.....	51
2.4.2 Naměřené hodnoty voskových modelů a odlitků SOUČÁST 1.....	52
2.4.3 Vyhodnocení rozměrů voskových modelů a odlitků SOUČÁST 1...57	
2.4.4 Naměřené hodnoty voskových modelů a odlitků SOUČÁST 2.....	63
2.4.5 Vyhodnocení rozměrů voskových modelů a odlitků SOUČÁST 2...68	
2.5 Shrnutí výsledků	74
2.6 Návrh dalších experimentů	79
ZÁVĚR	80
Seznam použitých zdrojů.....	81
Seznam použitých zkratk a symbolů	83

ÚVOD

Technologie vytavitelného modelu (na "ztracený vosk" nebo také "přesné lití") zaujímá jedno z předních míst mezi moderními slévárenskými technologiemi. Tato výrobní metoda se za poslední léta vyvinula z technologie považované za metodu specializovanou na technologii, která je v dnešní době hojně rozšířená. Splňuje požadavky zákazníků na odlitky z pohledu tvarové a rozměrové přesnosti i materiálové náročnosti. [1]

Z historického hlediska jde o nejstarší technologii lití na světě. Je známá asi od roku 3500 př.n.l.[2]. Důkazem jsou umělecká díla již dávno zaniklých národů. Technologie, která se používala, byla přitom shodná s dnešní moderní technologií jen v principu. Na originální model, který byl ze včelího vosku, byla ručně nanesena vhodná hlína a tak vyrobena forma. Duté odlitky byly zhotoveny s pomocí hliněných jader. V období ranného novověku byly nalezeny důkazy o existenci metody vytavitelného modelu, především v renesanční Itálii. [1]

Později došlo k jejímu zapomnění, ale během 2. světové války byla technologie přesného lití znovu objevena. Prvními uživateli přesných odlitků se stali výrobci leteckých proudových motorů a zbrojní průmysl. Od počátku byly na přesně lité odlitky kladeny náročné požadavky, což vedlo k rozvíjení technologie. Jak se technologie zdokonalovala, tak se více rozšiřovalo využití přesného lití vytavitelným modelem. V dnešní době se převzal jen princip výroby forem a tak ostatní obory jako chemie a metalurgie, vytvořily z tohoto oboru důležitou součást metalurgických technologií.

Dnes se přesného lití vytavitelným modelem využívá ve strojírenství a to ve všech odvětvích, v leteckém a automobilovém průmyslu, lékařství a také ve výtvarném umění. Nelze říci, že přesné lití je náhradou za klasické technologie (obrábění, lisování, kování). Přesné lití má pouze doplňovat ostatní výrobní způsoby a je vhodné pouze tam, kde konstrukčně-technické parametry vytvářejí takové podmínky, že výrobní náklady budou nižší ve srovnání s ostatními způsoby výroby. Přesné lití má své hranice především v rozměrových tolerancích, drsnosti povrchu, v celkových rozměrech. Přesné lití metodou vytavitelného modelu je taková metoda, která nám umožňuje vyrobit odlitky tvarově složité, s malými rozměrovými tolerancemi a s dobrou jakostí povrchu. Tato metoda se využívá zejména tam kde je vyžadován složitý tvar a obtížně obrobitelný materiál. Přesné lití je velmi vhodný doplněk k rozhodování o tom jakou technologii k výrobě strojního součásti použít. [3]

Cílem slévačů je stále častěji výroba odlitků "téměř na hotovo" bez dokončovacích operací. Je to metoda vedoucí k přímé, efektivní a ekonomické výrobě konečné součásti. [1]

Současná situace sléváren přesného lití v České republice je velmi dobrá [2]. České slévárny přesného lití dokáží vyrobit velmi jakostní odlitky a to ze všech kovových materiálů. Je nutno podotknout, že slévárenství není dnes již černé řemeslo, ale je to moderní odvětví třetího tisíciletí. [4]

Cílem diplomové práce je zjištění možností dosažení rozměrových tolerancí u jednotlivých fází zhotovení odlitků metodou vytavitelného modelu.

1 TEORETICKÁ ČÁST

1.1 Definice přesného lití [5]

Za přesné lití se považují všechny metody lití, které mohou vyrobit přesnější odlitky než běžné slévárenské metody. Vhodnější je používat termín přesné lití jen pro ty metody, které umožňují vyrábět odlitky s relativní přesností než je $\pm 0,25\%$. V tomto případě do technologie přesného lití patří metoda vytavitelného (spalitelného, vyplavitelného, rozpustitelného) modelu.

V **Tab. 1.1** jsou uvedeny údaje o přesnosti jednotlivých metod, jenž patří k metodám přesného lití.

Tab. 1.1 Přesnost jednotlivých metod (5)

Přesnost lití	Dosažitelná optimální tolerance pro jmenovitý rozměr 30 až 50 mm
Vytavitelným modelem	$\pm 0,03$ až $\pm 0,1$ mm
Shawova metoda	$\pm 0,1$ až $\pm 0,3$ mm
Tlakové lití	$\pm 0,05$ až $\pm 0,2$ mm
Kokilové lití	$\pm 0,1$ až $\pm 0,3$ mm
Lití do písku	± 1 až ± 2 mm

Z tabulky vyplývá, že ze všech uvedených metod, je nejpřesnější metoda vytavitelného modelu. Technologie přesného lití je schopna vyrábět tvarově složité strojní součásti, u nichž se část funkčních ploch vyrábí již při lití s dostatečnou drsností povrchu a s rozměrovou tolerancí bez nákladného obrábění. Metoda vytavitelného modelu je speciální metoda přesného odlévání, kterou se vyrábí tvarově velmi složité a rozměrově přesné odlitky s velmi dobrou jakostí povrchu. Využití této metody je zejména tam, kde se zřetelem na složitý tvar a obtížně obrobitelný materiál je výroba součástí jinou technologií nákladná, někdy zcela nemožná.

1.2 Postup výroby odlitku technologií vytavitelného modelu

Technologii vytavitelného modelu lze rozdělit do několika výrobních fází:

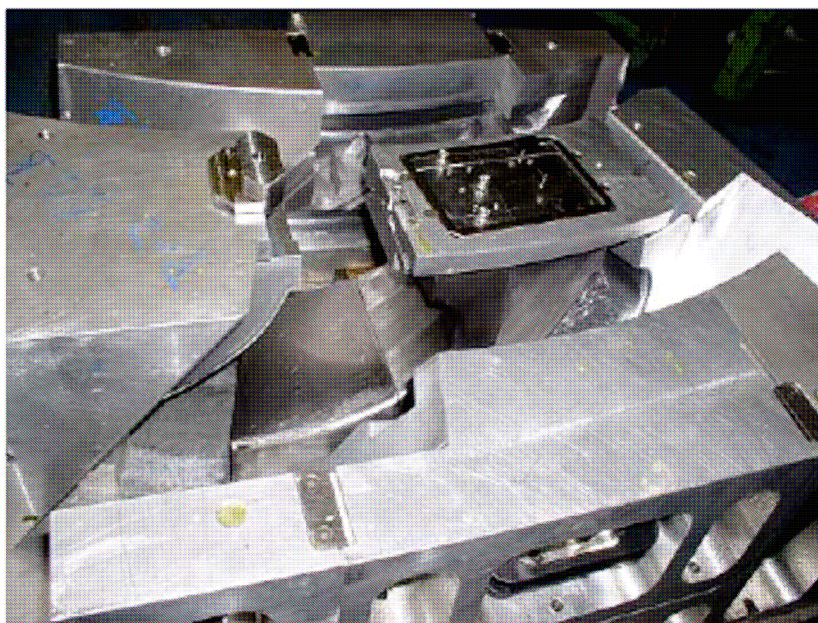
1.2.1 Výroba matečné formy

K výrobě přesného odlitku je nutné zhotovení přesného modelu s kvalitním povrchem a s přesně dodrženy rozměry, respektující všechny technologické vlivy, které se v průběhu výroby odlitku vyskytnou. Pro výrobu přesného modelu je nutné, aby byla k dispozici přesně vyrobená forma, která musí splňovat základní požadavky:

1. Výroba zdravých odlitků modelů s kvalitním povrchem tj. bez propadlin, staženin, vzduchových bublin a jiných povrchových vad s předepsanou přesností rozhodujících rozměrů.
2. Odstříknutý model by měl setrvat ve formě co nejkratší dobu.
3. Čím přesněji bude vyrobena matečná forma, tím přesnější bude odlitek.

1.2.2 Materiály pro výrobu matečné formy

Formy vyrobené obráběním – nejdříve se používaly pro výrobu vytavitelného modelu. Jejich výhodou je, že nepotřebují k zhotovení dutiny matečný model, protože forma se i s dutinou zhotoví na obráběcích strojích. Jako materiál se používá ocel a slitiny lehkých kovů. Formy se vyrábějí s přesností IT6.



Obr. 1.1 Forma s výsuvnými částmi vyrobená obráběním (6)

Formy s nízkotavitelných slitin – jejich výhoda je v poměrně rychlé a jednoduché výrobě. Litě Formy se vytváří zalitím do kovového matečného modelu nízkotavitelnou slitinou. Model je uložen v ocelovém plášti. Obě dvě části formy jsou z jiných materiálů, které mají různé teploty tavení. Tavicí teplota nízkotavitelné slitiny je 150°C (51% Sn, 31% Pb, 18% Cd). Leštění a zaškrabávání se používají jako dokončovací operace funkčních ploch formy. Formy se vyrábí s přesností IT 8-9.

Formy ze sádry – trvanlivost forem a nároky na rozměrovou přesnost jsou minimální. Používají se k výrobě uměleckých předmětů

Formy vyrobené galvanoplasticky – tyto formy se používají na přesné a komplikované modely, které mají nízkou hmotnost. Nejsou vhodné na výrobu modelů s hlubokými drážkami, zářezy a otvory. Jejich výroba je drahá.

Formy ze silikonové gumy – formy slouží k výrobě voskových modelů, u nichž jsou minimální nároky na rozměrovou přesnost. Výhodou je, že jsou vyrobeny z pružného materiálu a umožňují výrobu modelů s negativními úkosy.

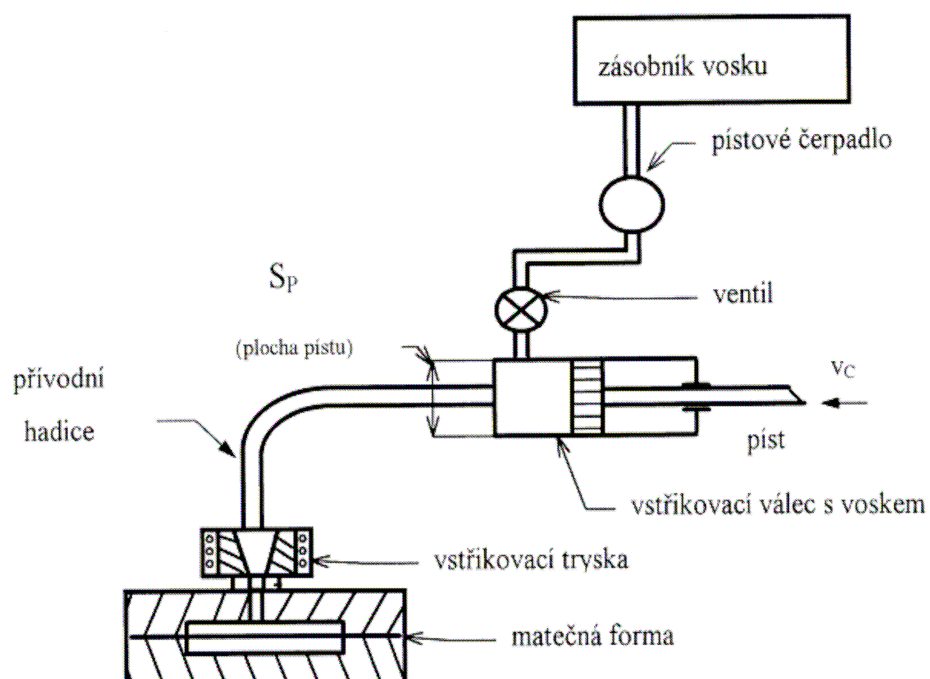
Ostatní – formy vyráběné metalizací, dřevěné formy. [5]

1.2.3 Zhotovení voskového modelu

Voskové modely se zhotovují podle použitého tlaku a teploty třemi způsoby:

1. Gravitační lití – nad teplotou likvidu vosku
2. Odstříknutí za zvýšeného tlaku (0,5–1 MPa) – těsně pod teplotou likvidu
3. Odstříknutí za vysokého tlaku (2,5–8 MPa) – pod teplotou likvidu z kašovitého stavu

Gravitační lití se při kusové výrobě používá velmi výjimečně. Vstřikolisy se používají pro výrobu voskových modelů pod tlakem. Vstřikováním nízkého tlaku získáme modely s hladším povrchem, ale rozměrově méně přesné. Naopak vstřikováním vysokého tlaku mají modely horší kvalitu povrchu, ale mají přesnější rozměry. U těchto modelů se vyskytuje menší množství povrchových staženin.

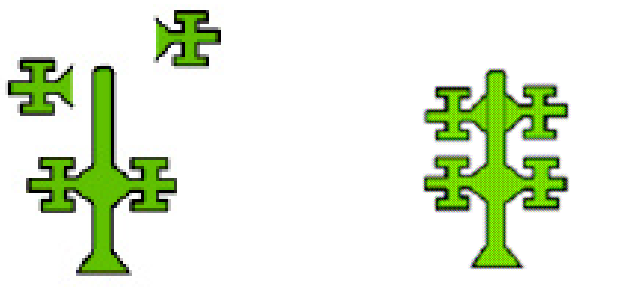


Obr. 1.2 Schéma vstřikolisu (1)

1.2.4 Sestavení voskových modelů

Po stabilizaci voskového modelu dochází k sestavení menších modelů do tzv. stromečku, kde na jednom stromečku je přítomno velké množství budoucích odlitků. Velké množství modelu na vtokové soustavě zvyšuje využití tekutého kovu. Voskové modely se spojují s vtokovou soustavou pájením nebo lepením.

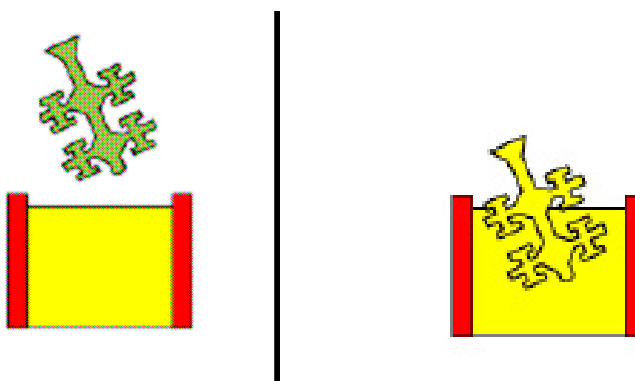
Způsob připojení voskových modelů, obalování, vytavování, lití a oddělování hotových odlitků jsou závislé na tvaru stromečku.



Obr. 1.3 Sestavení stromečku (6)

1.2.5 Obalování voskových modelů

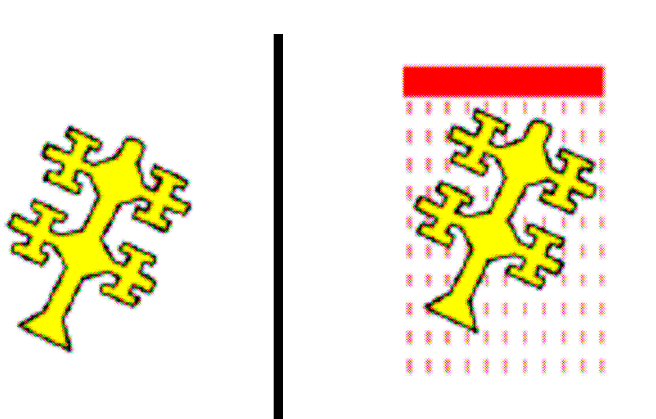
Odmaštěné stromečky se postupně ponořují do keramické břečky o požadované hustotě a otáčením dochází k odstranění vzduchových bublin. Keramická břečka je tvořena pojivem (alkosoly nebo hydrosoly) a plnivem (nejčastěji křemenná moučka). Po vyjmutí stromečku z keramické břečky a jejím dostatečném okapání se stromeček posype ostřivem vhodné zrnitosti. Posypání se fluidním způsobem nebo proudem padajícího ostřiva. Schnutí jednotlivých obalů je závislé na použitém druhu pojiva.



Obr. 1.4 Namáčení stromečku do keramické břečky (6)

1.2.6 Sušení obalů

Sušení jednotlivých obalů se provádí na vzduchu (řízená teplota, vlhkost a proudění) nebo při použití plynného činidla (čpavku).



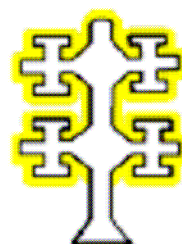
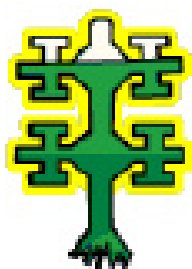
Obr. 1.5 Dokončená skořepina (6)

1.2.7 Vytavování modelové hmoty

Vytavování slouží k odstranění voskového modelu z dokonale usušené skořepiny. Tohoto procesu lze dosáhnout různými způsoby:

- a) Za vysoké teploty
 - vložením do pece s teplotou minimálně 750 °C s následujícím žíháním skořepiny
- b) Za nízké teploty
 - ve vroucí vodě
 - v autoklávu – přehřátá pára (0,3 – 0,6 MPa, $t = 135 - 165$ °C)
 - dielektrickým ohřevem – ohřev navlhčené skořepiny umístěné v poli vysokofrekvenčních oscilací
 - proudem teplého vzduchu – foukání horkého vzduchu do středu voskového modelu

Je známo, že čím větší bude účinek tepelného nárazu, tím rychleji dojde k odtavení povrchu voskového modelu. Zbýlý voskový model nedokáže vlastní dilatací poškodit skořepinu, která dilatuje méně.

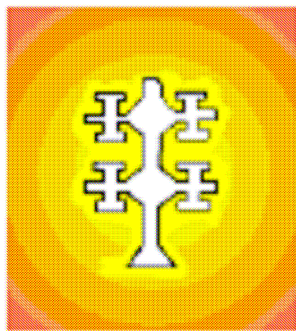


Obr. 1.6 Vytavení vosku (6)

1.2.8 Žíhání skořepin

Žíháním dochází k převedení amorfní formy vazné vrstvičky SiO_2 na krystalickou formu a při současném odstranění všech těkavých látek. Žíhací teplota pohybuje kolem 1000°C.

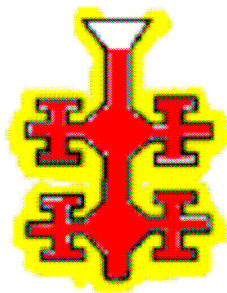
Keramika na bázi SiO_2 vyžaduje pomalejší a rovnoměrnější ohřev z důvodu krystalografických změn křemene.



Obr. 1.7 Žíhání skořepiny (6)

1.2.9 Odlévání

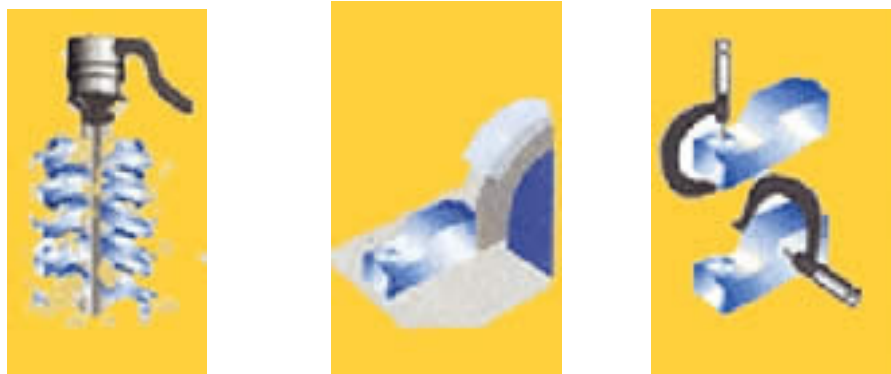
Keramické formy se odlévají na vzduchu nebo ve vakuu. Skořepinové formy mají při odlévání teplotu 700 – 800 °C (tzv. lití do žhavých forem) nebo teplotu okolí (tzv. lití do studených forem).



Obr. 1.8 Lití kovu (6)

1.2.10 Apretace a kontrola odlitků

Oddělování odlitků od skořepiny se provádí ručně nebo mechanicky. Tvarově složité odlitky se zbavují keramiky otryskáním a poté jsou odděleny od vtokové soustavy. Dokončení tvaru se provádí obráběním. Kvalita odlitku se kontroluje různými metodami měření. Rentgenové zkoušky se používají na zjištění vad v odlitku. [7]



Obr. 1.9 Odstranění skořepiny, broušení a kontrola odlitku (8)

1.3 Modelové hmoty

Pro výrobu vytavitelného modelu se nejčastěji používají vosky, zejména voskové směsi (**Obr. 1.10**), jelikož jednoduché vosky neodpovídají nárokům, které jsou kladeny na modelovou hmotu. Většina modelových hmot poskytuje kvalitní povrch modelu. Přídavkem k základnímu rozměru se zajišťují rozměry modelů s dostatečnou přesností. Velmi obtížně lze zaručit geometrický tvar, protože modelová hmota v průběhu tuhnutí mění rozměr, to se projevuje u velkých modelů a u modelů s rozdílným tloušťkami stěn. [5]



Obr.1.10 Voskové směsi (6)

Vosk patří mezi nejstarší termoplastické materiály. Může být utvořen v tekutém, polotekutém a plastickém stavu. Jeho historie byla úzce spojená s uměleckými řemesly. V minulosti používali řemeslníci z Číny a Egypta metodu ztraceného vosku, ale název uváděl jen včelí vosk. Nicméně, v dnešním průmyslu přesného lití se slovo "vosk" používá na jakoukoliv látku, která se vyznačuje voskovými vlastnostmi.

1.3.1 Složení voskových směsí

Pro metodu ztraceného vosku se používají moderní směsi mající komplexní vlastnosti. Tyto směsi jsou složeny z:

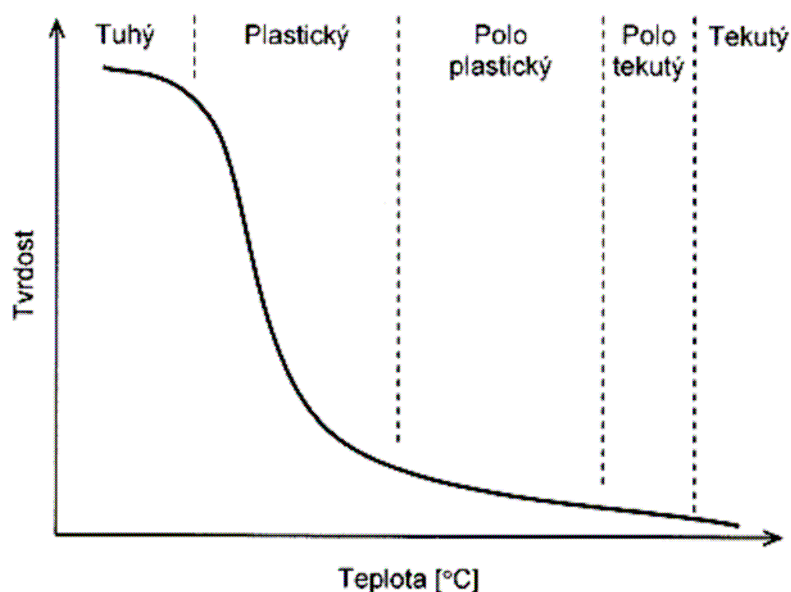
- přírodních uhlovodíkových vosků
- přírodních ester vosků
- syntetických vosků
- přírodních pryskyřic
- syntetických pryskyřic
- organických přídavných materiálů
- vody

Střídání těchto složek napomáhá k dosažení optimálních požadavků:

- bod taní a tuhnutí
- tvrdost a pevnost
- viskozita
- roztažnost a smrštění
- rychlost tuhnutí
- nízký obsah popela atd.

Všechny požadavky ovlivňují složení a strukturu voskové směsi [9]. Pro vnitřní strukturu je typické řetězení uhlíkových atomů. Délka a tvar řetězení atomů ovlivňuje tvrdost, viskozitu, ale i teplotu tavení [10]. Čím kratší je řetězení, tím má vosk nižší bod taní a hodnotu tvrdosti. Se zvětšující se délkou se zvyšuje tvrdost, bod tání nebo tuhnutí. Podmínka, že ztracený vosk je směs velkého počtu složek, které mají různé délky řetězců má za následek, že vosk prokazuje odlišné fyzikální chování od jiných látek.

Vosk nelze roztavit rychlým ohřevem jako další chemické stejnorodé sloučeniny, ale prochází různými přechodovými stavy. Tyto jevy jsou ilustrovány na **obr. 1.11**



Obr. 1.11 Závislost tvrdosti vosku na teplotě (1)

Z tvaru křivky s pozvolným ohřevem je zřejmé, že vosk, který má na počátku pevnou konzistenci se stává měkký, dále plastický a s následným ohřevem, těstovitý. Ve vyšší teplotě získává vosk konzistenci hutné kapaliny (polotekuté). V konečné fázi probíhá kompletní tavení na Newtonovu kapalinu. Postupná změna v celkovém stavu nastává od krátkých zlomkových řetězců roztavených jako první, ale delší řetězce zůstávají pevné. S následným zvýšením teploty, pozdější roztavený kov dosáhne kapalného stavu. Aktuální tvar křivky a teplotní rozmezí každé fáze je přirozený odraz specificky provedené směsi. Opačný proces bude probíhat při ochlazování a bude se opakovaně vyskytovat podle provedení směsi přes delší a kratší rozsah teplot.

1.3.2 Vlastností modelových hmot

Jak je vysvětleno v předchozí kapitole, většina vosků pro metodu ztraceného vosku jsou komplexní směsi četných složek. Každá složka je zahrnutá k tomu, aby do určité míry ovlivňovala konečné vlastnosti voskových směsí. Tyto vlastnosti vosku mají prvořadý význam pro slévárnu, aby produkovala dobré odlitky. Jak jde kupředu vývoj průmyslu, bude kladen ještě větší důraz na kontrolu těchto vlastností.

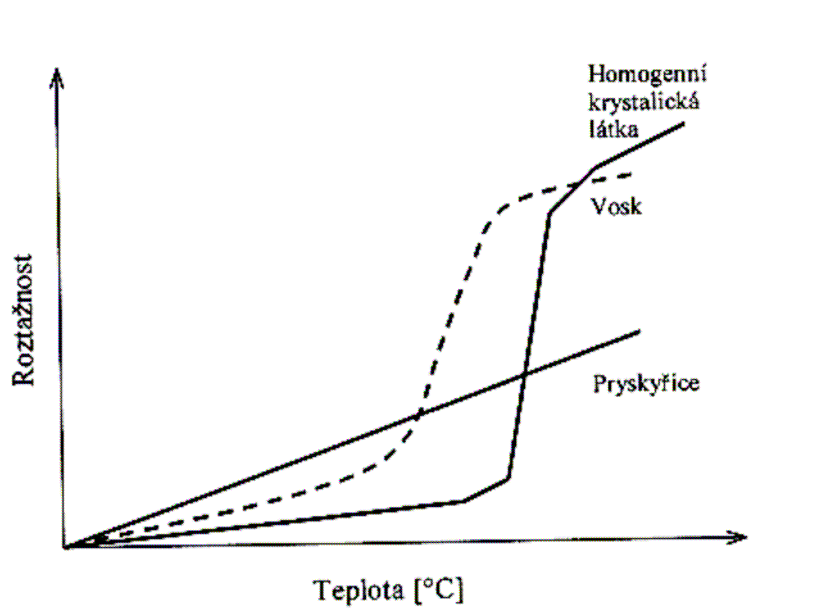
Tyto vlastnosti obsahují :

- smrštění
- bod tuhnutí a taní
- obsah popelovin
- viskozitu
- tvrdost a pružnost

- dobrou povrchovou úpravu
- rychlost tuhnutí
- stálost při oxidaci
- regenerovatelnost atd.

Struktura nebo složky vosku také ovlivňují rozpínavost a smrštění. Vosk se rozpíná jako další materiály pod vlivem tepla a při chlazení se smršťuje. Ve srovnání s kovem je rozpínavost vosku větší.

Roztažnost vosku mezi teplotou 20°C a bodem tavení není rovnoměrná, ale mění v rozsahu teplot v závislosti na změně struktury. Křivky roztažnosti materiálu jsou znázorněny na **obr. 1.12**

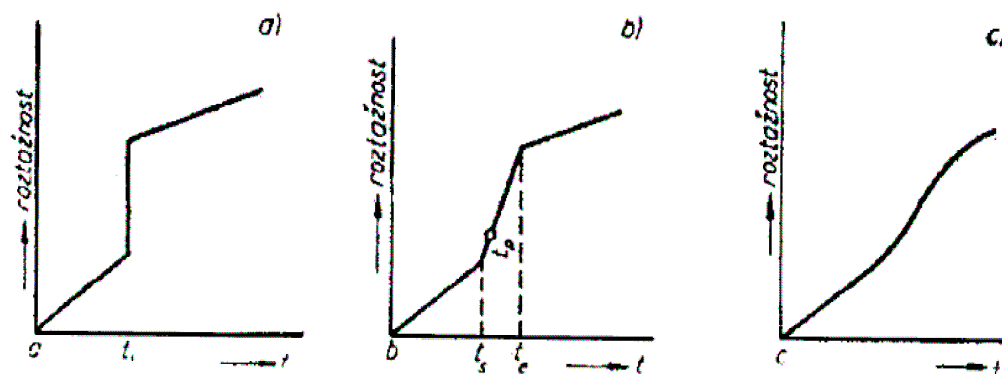


Obr. 1.12 Porovnání roztažnosti homogenní krystalické látky, voskové směsi a pryskyřice (1)

Z obrázku je patrné, že organická látka podstupuje v průběhu ohřevu relativně malou expanzi. V bodě tavení dochází k rozpadnutí krystalické struktury a přejde do kapalného stavu. Jev je charakterizovaný rychlým zvětšením objemu. V kapalném stavu je expanze znovu malá. K přechodu z pevného skupenství do kapalného u voskových směsí dochází ve velkém rozmezí teplot.

Amorfní pryskyřice má jiné vlastnosti. Závislost roztažnosti na teplotě u amorfní pryskyřice je lineární. [9]

Mezi nejzákladnější znalosti chování směsí patří tepelná roztažnost, která nám ukazuje obraz o lineárním smrštění dané směsi.



Obr. 1.13 Závislost roztažnosti na teplotě (5)

Křivka tepelné roztažnosti čisté látky znázorněná na **obr. 1.13** ukazuje, že roztažnost se vzrůstající teplotou roste lineárně, až do okamžiku, kdy dochází k roztavení materiálu. Změna objemu se projeví při změně skupenství prudkým nárůstem roztažnosti. V kapalně oblasti je průběh roztažnosti lineární. Na obrázku b) je znázorněna křivka roztažnosti směsi látek, která se liší jen tím, že změna skupenství se neuskuteční při jedné teplotě, ale v rozsahu teplot. Teplotní rozsah bude tím větší, čím bude směs látky různorodější. Křivka má lineární průběh až do bodu tání. Změna skupenství probíhá postupně a je provázána změnou objemu. V kapalně oblasti je průběh roztažnosti lineární. Z obrázku c) je vidět průběh roztažnosti modelových vosků. Modelové vosky jsou tak různorodé, že nemají teploty t_s a t_c na křivce roztažnosti příliš výrazné.

Z křivek tepelné roztažnosti je patrné, že smrštění modelu bude tím vyšší, čím vyšší bude teplota při vstřikování, proto je potřeba vyrábět voskové modely při teplotě co nejnižší, aby byly modely co nejpřesnější. [5]

1.3.3 Rozdělení a složení voskových směsí

Podle typu se voskové směsi dělí na:

- přímé (neplněné)
- plněné
- emulzifikované

Přímý (neplněný) vosk – je v provedení komplexní směsi, která je složená z voskových a pryskyřičných částí. Povrchová úprava má být lesklá. Tyto směsi se regenerují a jsou rekonstituovány na další využití vtokových systémů.

Emulzifikovaný vosk – má obdobně základní suroviny jako přímý vosk, ale je emulzifikován s vodou normálně mezi 7-12 %. Emulzifikovaný vosk má povrchovou úpravu hladkou. Malá kavitace vzniká v důsledku působení vody

jako částečného plniva. Za předpokladu, že slévárna dodržuje podmínky dané dodavatelem je manipulace s emulzifikovaným voskem velmi snadná. Je značně využívána pro jeho všestrannost. Směsi se regenerují a rekonstruuji pro použití na vtokové systémy.

Plněný vosk – má stejné základní suroviny jako předešlé typy vosku. Do plněného vosku se přidává práškový, netečný přídavný materiál, který dává směsi větší stabilitu a menší kavitaci. Použité plnivo je základ pro zajištění kompletního shoření bez zanechání popele. Využívá se určitého počtu přídavných materiálů. Aby povrchová úprava nebyla zhoršena, je nutné použít vhodnou velikost částic plniva. Je důležité zabezpečit váhu plniva, aby byla co nejvíce podobná váze základního vosku, pro zajištění minimálního odloučení, když je vosk v kapalném stavu. I tento vosk je široce užívaný a obvykle může být regenerován a rekonstruován pro použití na vtokové soustavy.

Vosk používaný na vtoky – má velmi podobné základní suroviny jako přímý vosk. Je míchán tak, aby byl splněn požadavek na pevnost vtokového kúlu.

Vosk rozpustný ve vodě – je určen k tomu, aby produkoval vnitřní tvary, které by bylo obtížné vytvořit jinými způsoby. Vosk se rozpouští ve vodě nebo roztoku, který má mírně kyselý charakter.

Speciální vosky – mají charakter neplněných voskových směsí. Používají se pro namáčení, spravování a opravu a jsou vhodné k lepícím aplikacím. [9]

1.3.4 Hlavní složky modelových vosků

Modelové vosky lze rozdělit na přírodní a syntetické.

I. Přírodní modelové vosky

Přírodní modelové vosky se dále rozdělují na měkké a tvrdé.

Měkké modelové hmoty – nejčastěji se používají pro výrobu modelů gravitačním litím. Základní složkou bývá nejčastěji ceresin nebo parafín.

Cerezín – jedná se o směs tvrdých metanových uhlovodíků a jako čistý se vyskytuje v podobě menších krystalků jehličkovitého tvaru. Ve srovnání s parafínem měkne při vyšších teplotách a má větší odolnost vůči deformaci. Jeho nevýhodou je nízká pevnost, tvrdost a lineární smrštění až 3,5%.

Parafín – jedná se o směs tvrdých metanových uhlovodíků. Je měkký při teplotě 30°C. Teplota tavení se pohybuje v rozsahu od 42° C do 62°C. Parafín obsahuje do 0,1% popela.

Tvrdé modelové hmoty – používají se k výrobě voskových modelů na vstříkolisech. Základními složkami jsou montanní vosk a změkčující látky.

Montanní vosk – směs voskové, přiskyřičné a asfaltické látky o různém poměru. Je hlavní složkou "tvrdých" modelových směsí přisuzují jim charakteristické vlastnosti, mimo jiné: tvrdost, úzký interval tuhnutí a dostatečnou stabilitu za normálních a zvýšených teplot. S rostoucím podílem asfaltických látek se zhoršuje kvalita a mechanické vlastnosti vosku. Teplota vosku bývá až 120°C.

Romonta – je směs monokarbidické kyseliny, hydrokyseliny, esterů, montánní pryskyřice a asfaltických částí. Nejčastěji se kombinuje s cerezí a tvoří rychle tuhnoucí směs. Gravitačně lité modely praskají z důvodu rychlého tuhnutí, proto se do směsi přidává kalafuna, aby prodloužila interval tuhnutí.

Kalafuna – tvrdá složka smoly jehličnatých stromů. Používá se borová kalafuna, která má obsah popela do 0,04% a minimální teplotu měknutí 66°C.

II. Syntetické modelové vosky

Syntetické modelové vosky se nejčastěji skládají z těchto složek:

- pryskyřice
- vosky a polymery
- plnivo

Pryskyřice – jedná se o amorfni látku v ideálním případě o inertní látku, která zabezpečuje tekutost a dělí se na:

- přírodní
- částečně syntetické
- plně syntetické

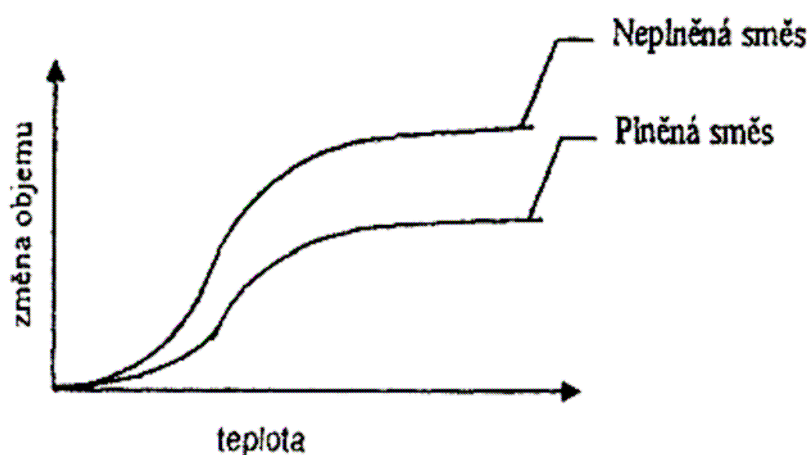
Velké množství druhů pryskyřic není zcela inertní a oxiduje, proto je důležité použít stabilizátor.

Vosky a polymery – vosk je inertní látka. Kvalitní vosk se míchá z více vosků a polymerů. Polymery zvyšují viskozitu a výrazně ovlivňují fyzikální vlastnosti.

Rozdělují se na:

- petrolejové
- syntetické
- přírodní

Plnivo – plněné směsi se vyznačují nárůstem od neplněných směsí podstatně nižším smrštěním, čímž se zamezí vzniku staženin. Vhodným výběrem plniva lze velmi podstatně ovlivnit tepelné, a mechanické vlastnosti modelového vosku. [1]



Obr. 1.14 Porovnání tepelné roztažnosti plněné a neplněné směsi (1)

Plniva by měla splňovat následující požadavky:

- optimální velikost částice pod 100 μm
- kulovitý tvar
- minimální obsah popela
- netečnost vůči základnímu materiálu
- hustota plniva by se měla co nejvíce přiblížit hustotě základní hmoty, aby se odstranilo usazování, nebo vyplouvání částic plniva
- teplota tavení plniva by měla být vyšší než je provozní než teplota vosku
- tepelná vodivost plniva by měla být menší než tepelná vodivost základní hmoty z důvodu zabránění velké dilatace voskového modelu v průběhu vytavování. Velká dilatace by způsobila praskání forem.

Plniva se dělí podle stavu skupenství do tří skupin:

- tuhá plniva
- kapalná plniva
- plynná plniva

Tuhá plniva – nejčastěji se používají plastické hmoty jako polyetylen, polypropylen, polyvinylalkohol, polyvinacetát a polystyren. Tyto plniva mírně snižují pevnost. Jejich nevýhodou je, že prodlužují dobu tuhnutí, usazování částic.

Kapalná plniva – používaná látka je voda. Voda je rozptýlena ve vosku po rozmíchání. Poté modely mají kvalitní povrch a minimální smrštění.

Plynná plniva – nejčastěji se používá vzduch. Vzduch se vpravuje do kašovitého vosku, protože z tekutého vosku uniká při vysoké teplotě z důvodu nízké viskozity. Modelové směsi, které se plní vzduchem, se povrchově nedeformují, a proto lze použít nižší vstřikovací tlaky. [11]

1.3.5 Regenerace a rekonstituce voskových směsí

Rekonstituce vosků je proces, při kterém vosk vytavený v autoklávu nebo použitý vosk známého může být vyčištěn a smíchán s novými surovinami.

Vytavený vosk z autoklávu obsahuje vyšší podíl vody a plniva (plněný vosk), také části keramické formy a jiné nečistoty. Stupeň znečištění je různý a je ovlivněn různými faktory např. použitým druhem vosku, účinností autoklávu a způsobem výroby formy. Průzkumy ve slévárnách ukazují, že vytavený vosk z autoklávu obsahuje 5 – 25 % vody, podíl plniva se pohybuje mezi 15 – 35 %, stupeň keramického znečištění může dosáhnout až hodnoty 0,5%. Části keramické skořepiny, prach jsou obsaženy ve vytaveném vosku.[12]

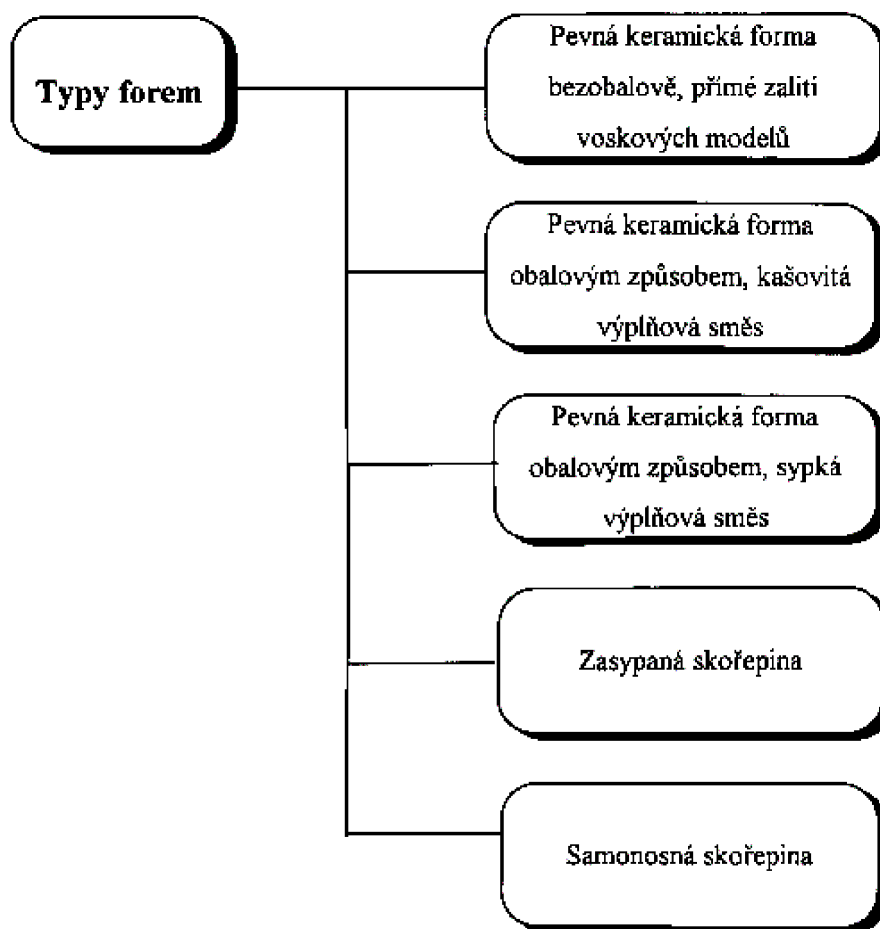
Jestliže slévárna chce provádět kvalitní regeneraci a rekonstituci měla by se řídit základními body pro zacházení s vosky, které jsou určeny pro regeneraci:

- a) vosk by neměl být smíchán s odpadními produkty – jako je rozbitá skořepina apod.
- b) použití silikonových prostředků potřebných k uvolňování voskových modelů s matečné formy by mělo být co nejmenší
- c) obsah vody ve vosku po jeho vytavení ze skořepiny by měl být udržován v minimálních objemech
- d) používání filtračního zařízení při vytavování vosku zabraňuje znečištění od keramických částí v průběhu vytavování vosku
- e) velikost bloku vytavených vosků by měla být volena s ohledem na snadné balení a přepravu
- f) bloky vosků musí být převázány a zabaleny, tím se zmenší možnost dalšího znečištění během skladování a přepravy. [9]

1.4 Keramické formy

1.4.1 Typy keramických forem

K výrobě odlitků metodou vytavitelného modelu se používá několik typů keramických forem, které jsou znázorněny na **obr 1.15**.



Obr. 1.15 Typy keramických forem pro lití metodou vytavitelného modelu (11)

1.4.2 Plniva keramických hmot

Plnivo je základem keramických formovacích směsí. Podle charakteru žáruvzdorného materiálu v obalové hmotě se určují především základní vlastnosti jako je žáruvzdornost, tepelná roztažnost a netečnost vůči vlévaným kovům.

Vhodný žáruvzdorný materiál by měl splňovat optimální požadavky:

- teplota tavení
- teplotní roztažnost
- chemická netečnost vůči vlévaným kovům

Mezi žáruvzdorné materiály patří oxidy II. skupiny periodického systému (MgO , CaO , SrO , BaO , BeO), III. skupiny (Al_2O_3 a oxidy lanthanoidů), IV. skupiny (SiO_2 , ZrO_2 , TiO_2 , MgO_2 , CaO_2) a binární oxidy typu $\text{CaO} \cdot \text{ZrO}_2$, $\text{MgO} \cdot \text{TiO}_2$, $\text{MgO} \cdot \text{ZrO}_2$, $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{SrO} \cdot \text{TiO}_2$, Al_2O_3 , TiO_2 . **[13]**

Vlastnosti oxidu používaných v průmyslové keramice jsou uvedeny v **tab. 1.2 [5]**

Tab. 1.2 Vlastnosti oxidů (5)

Oxid	σ při 20°C [kg/dm ³]	Teplota tavení [°C]	Tep. roztažnost [%]
SiO ₂	2,65	1560	1,54
TiO ₂	4,25	1850	0,25 – 0,29
Al ₂ O ₃	4	2040	0,21 – 0,97
ZrO ₂	5,7	2715	0,21 – 1,10
BeO	3	2750	0,21 – 1,00
MgO	3,6	2800	0,25 – 1,45
UO ₂	10,9	2850	0,28 – 1,10
ThO ₂	10	3170	0,28 – 1,00

Z tabulky vyplývá, že oxid křemičitý má nízkou žáruvzdornost a značnou tepelnou roztažnost. SiO₂ se používá většinou pro nízkotavitelné slitiny (slitiny Al) z důvodu nízké žáruvzdornosti. SiO₂ prochází několik krystalografických změn, které jsou spojené s objemovými změnami. K první krystalografické změně dochází již při teplotě 575 °C, kdy se mění α -křemen na β -křemen, při nárůstu objemu asi o 2 %. K dalším přeměnám dochází při teplotách 870 °C (tridymit) a 1470 °C (cristobalit) [5]. Přetavením se snižuje teplotní délková roztažnost, zabraňuje se vzniku krystalografických přeměn, ale nízká žáruvzdornost se nemění. [14]

Z vlastností oxidů je patrné, že pro výrobu keramických skořepin je vhodný oxid hlinitý, berylnatý a zirkoničitý. Oxid berylnatý se nepoužívá do formovacích směsí pro svou vysokou toxicitu. Používá se jen pro laboratorní účely. Oxid zirkoničitý je stabilizován oxidy některých kovů, aby měl vyhovující teplotní délkovou roztažnost. Nejvhodnější je oxid hlinitý, který se používá v tavené formě (umělý korund). [5]

Další skupinou plniv jsou křemičitaný typu 3Al₂O₃ · 2SiO₂ (mulit), Al₂O₃ · SiO₂ (silimanit, kyanit), ZrO₂ · SiO₂ (zirkon), 2MgO · 2Al₂O₃ · 5SiO₂ (cordierit), molochit (mullit + amorfni SiO₂), CaAlSiO_x a LiAlSiO_x [13]. V **tab.1.3** jsou uvedeny vlastnosti křemičitanů.

Tab. 1.3 Vlastnosti křemičitanů (5)

Materiál	σ při 20°C [kg/dm ³]	Teplota tavení [°C]	Tep. roztažnost [%]
Forsterit 2MgO · SiO ₂	2,5	1910	1,2
Sillimanit Al ₂ O ₃ · SiO ₂	3,25	1545	0,43
Mullit 3Al ₂ O ₃ · 2 SiO ₂	2,7	1750	0,16 – 0,55
Zirkon ZrO ₂ · SiO ₂	4,7	2095	0,16 – 0,63
Spinel MgO · Al ₂ O ₃	3,6	2050	0,97

Ze skupiny křemičitanů je nejvíce výhodný mullit a zirkon. Silimanit má vyhovující vlastnosti, ale nízký bod tání [5]. Mullit má lepší mechanické vlastnosti než SiO_2 a lepší odolnost vůči teplotním rázům než Al_2O_3 . Mullit má nižší odolnost vůči taveninám než Al_2O_3 , ale proti většině běžných kovů je odolný [13]. Připravuje se pálením různých druhů kaolínu při teplotě nad $1500\text{ }^\circ\text{C}$, čímž vzniká mullit v obálce SiO_2 .

1.4.3 Pojiva keramických hmot

Obalová hmota pro výrobu skořepinových forem je tvořena pojivem a plnivem.

Pojivo musí mít tyto vlastnosti:

- nesmí snižovat žáruvzdornost formy
- musí být netečné k žáruvzdornému materiálu
- nesmí reagovat s odlévaným kovem
- musí dát formě dostatečnou manipulační a technologickou pevnost [5]

Keramická břečka obsahuje tři druhy pojiv. Jsou to alkosoly, hydrosoly a hybridní pojiva. Tyto pojiva jsou koloidní roztoky, které se odlišují podle toho, v jakém disperzním prostředí jsou rozptýleny. [13]

Alkosoly – nejznámějším alkosolovým pojivem je Etylsilikát 40 (obchodní název). Jedná se o směs polyethoxysiloxanů, v níž převažuje dodekaethoxy-pentasiloxan. Alkoholický roztok etylsilikátu spolu s vodou a vhodným hydrolyzačním katalyzátorem vytváří velmi stabilní kapalné pojivo. Při hydrolytickém štěpení vznikají polykřemičité kyseliny. Tyto kyseliny se seskupují do částic koloidní velikosti a řetězově se spojují a gelují.

Hydrolyza pojiva z etylsilikátu 40 je podmínkou pro jeho přípravu. Stupeň hydrolyzy vyjadřuje množství použité vody v poměru k množství etylsilikátu 40. Toto množství se pohybuje mezi 9,5-26 %. Dostatečné množství se udává kolem 15 % vody. Při použití většího množství vody dochází k pomalejšímu schnutí, nižší pevnosti obalů a zkrácení životnosti pojiva. Důležitá je také teplota, která rozhoduje o životnosti a vlastnostech alkosolů SiO_2 a jeho hydrátů. Čím je teplota vyšší, tím se zkracuje doba pro samovolnou přeměnu soli v gel a snižuje se životnost vazné kapaliny. [5]

Hydrolyza probíhá ve vhodném rozpouštědle za přítomnosti kyselých hydrolyzačních katalyzátorů, protože etylsilikát není rozpustný ve vodě. Nejčastěji se používá jako hydrolyzační katalyzátor kyselina chlorovodíková. Lze použít i kyselinu dusičnou, fosforečnou a sírovou nebo organické kyseliny.

Na vlastnosti vyráběných pojiv má vliv:

- množství kyseliny chlorovodíkové
- rychlost přidávání vody s kyselinou
- teplota hydrolyzujícího systému

Hydrosoly – tyto vodné koloidní roztoky jsou dodávány do sléváren již hotové, upravuje se jen přísada smáčedel, které keramickou břečku napěňují. Napěnění se eliminuje přidáním zhasedel pěny. Hydrosoly jsou velmi stabilní roztoky, které mají pH 8-10 a jejich obsah bývá 20-40 hmotnostních %. Čím je větší obsah a jemnější disperze SiO_2 , tím je hydrosoly vhodnější. Hydrosoly se používají samostatně nebo s přísadou amoniaku. [14]

Jejich nevýhodou je, že při poklesu teploty pod bod mrazu zamrazují a po roztání již nemají původní vlastnosti. [5]

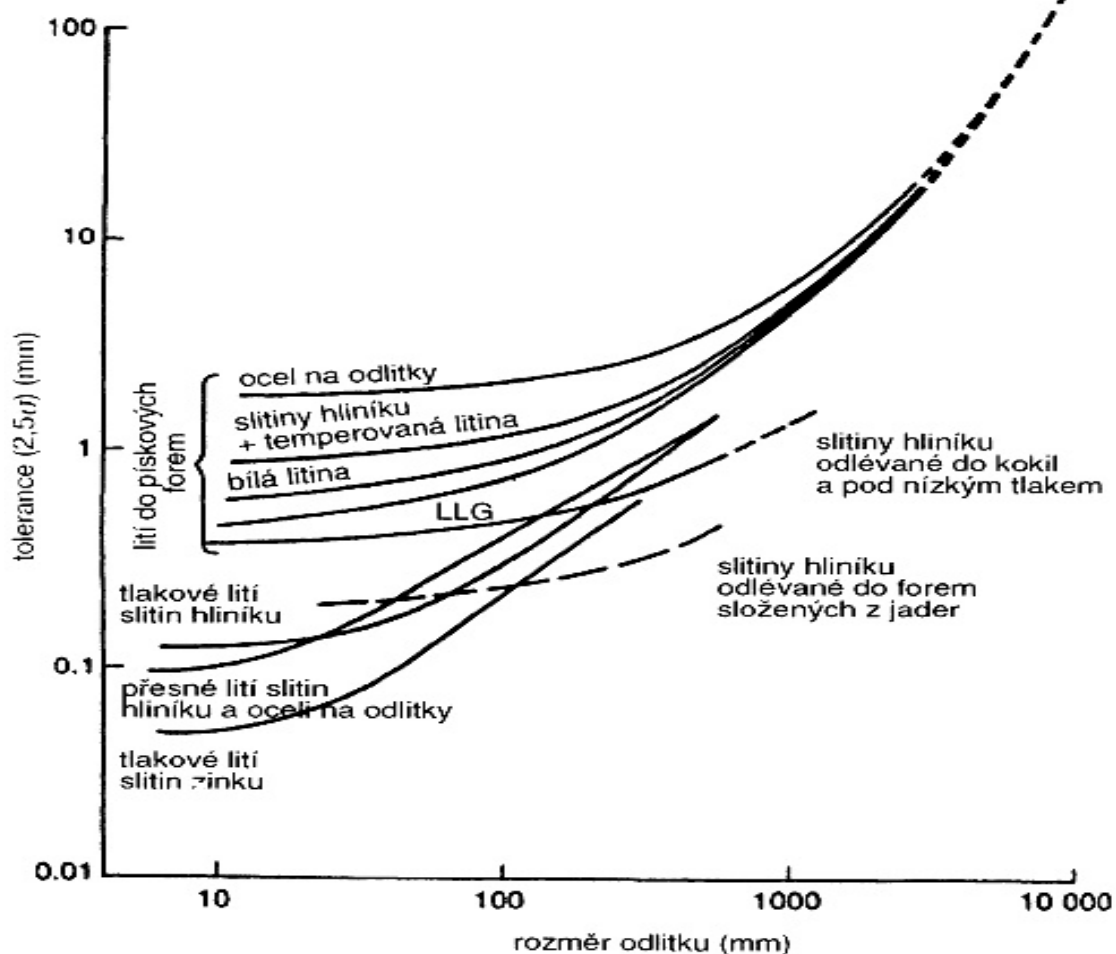
Hybridní pojiva – vyrábějí se z etylsilikátu 40 hydrolytickým štěpením okyseleným hydrosolem SiO_2 . Fosforečnany hořečnatý, hlinitý nebo zinečnatý se používají jako formovací materiály k odlévání slitin s nízkou teplotou tání.[14]

1.5 Rozměrové změny v průběhu technologie vytavitelného modelu [15]

Je důležité uvádět na výkresech tolerance, která se týká velikostí a tvarů odlitků, protože odlitky nejsou nikdy dokonalé. ISO normy pro tolerance odlitků uvádějí, že různé technologie vykazují různé možnosti dosahovaných přesností, proto je známo, že nepřesnosti odlitků rostou se vzrůstajícím jmenovitým rozměrem. Chyby v rozměrech odlitků (tj. odchylky od nominálních hodnot) je možno rozdělit na dva typy: statistické a systematické.

Statistické odchylky vznikají od nevyhnutelných malých odchylek proměnných procesů a způsobují rozptyl výsledků obecně s normálním rozdělením okolo střední hodnoty.

Systematické odchylky umožňují posunutí maximální hodnoty rozdělení od nominální hodnoty k vyšším nebo nižším hodnotám. Tyto odchylky plynou z nejistoty spojené s tolerancemi pro smrštění odlitků. Je to způsobeno tím, že se vezmou hodnoty "čistého" smrštění pro určitou slitinu a nebere se ohled na okruh problémů spojených s možnou plastickou deformací při brzděném smršťování.



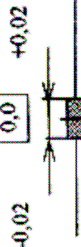
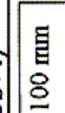
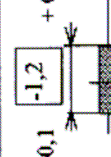
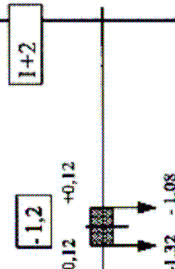
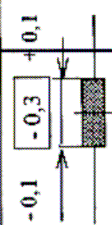
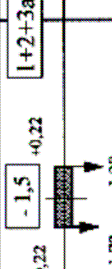
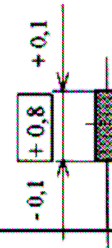
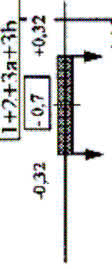
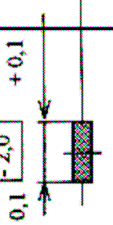
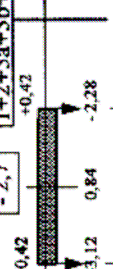
Obr. 1.16 Průměrné tolerance rozměrů (2,5σ) dosahované různými technologiemi odlévání (1)

1.5.1 Přesnost metody vytavitelného modelu

Jednou z metod výroby přesných odlitků z hlediska dosažitelnosti velmi úzkých rozměrových parametrů je metoda vytavitelného modelu.

Při podrobnějším seznámením s jednotlivými fázemi technologie vytavitelného modelu se nám ukáže, že dosáhnout úzkých rozměrových tolerancí není u této technologie vůbec snadné.

Tab. 1.4 Posuvy tolerančních polí rozměrů v průběhu technologie vytavitelného modelu (11)

N.	OPERACE	VLIVY NA SMRŠTĚNÍ/ROZTAŽENÍ	Očekávaná změna rozměru	Zvolená hodnota smrštění/roztahení	PŘÍKLAD	
					Individuální vlivy (1,2,3a,3b,4)	Souhrnné vlivy (1+2+3a+3b+4)
1,	VÝROBA MATEČNÉ FORMY	- Užitá technologie při výrobě matečné formy	0 % ($\pm \Delta_{Man.}$)	0 % ($\pm 0,02$ mm)		
2,	VOSKOVÝ MODEL	- Typ vosku - Doba odstřiku vosku - Rychlost vstřikování - Vstřikovací cyklus - Vstřikovací tlak	-W % ($\pm \Delta W$)	-1,2 % ($\pm 0,1$)		
3a,	SUŠENÍ SKOŘEPINY	- Druh materiálu - Systém sušení	+ S _d % ($\pm \Delta S_d$)	-0,3 % ($\pm 0,1$)		
3b,	ŽÍHÁNÍ SKOŘEPINY	- Druh materiálu - Systém žíhání	+ S _t % ($\pm \Delta S_t$)	+0,8 % ($\pm 0,1$)		
4,	LITÍ KOVU	- Chemické složení slitiny - Licí teplota	- A % ($\pm \Delta A$)	-2,0 % ($\pm 0,1$)		

Z **tab.1.4** vyplývá, že ve všech procesech technologie vytavitelného modelu se vyskytují rozměrové změny. Lze shrnout, že při zhotovení voskového modelu jsou nejdůležitější skořepinové formy a také fáze tuhnutí a chladnutí odlitku. Rozměrové změny při tuhnutí a chladnutí jsou určeny chemickým složením slitiny. Je důležitá teplota lití slitiny, proto ji nemůžeme libovolně měnit. Rozsah optimálních licích teplot je dán chemickým složením odlévané slitiny. Zabíhavost slitiny musí být správně zvolena s ohledem na konfiguraci odlitku.

1.5.2 Rozbor rozměrových změn v průběhu technologie

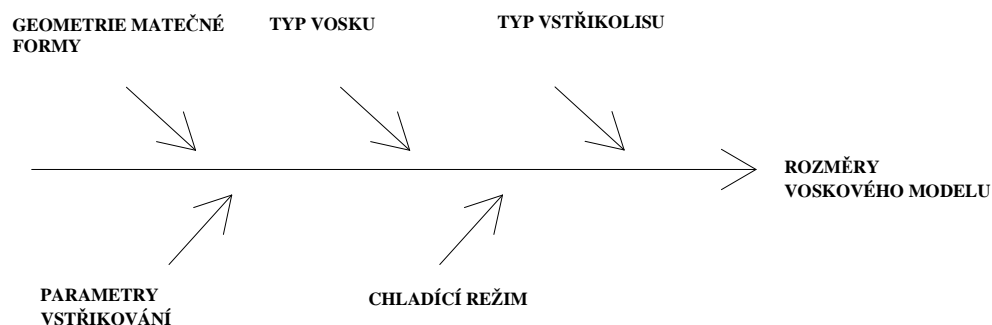
Je známo, že metoda vytavitelného modelu je technologie, kde další opracování není nutné. Je důležité vyrobít odlitek v úzkých rozměrových tolerancích už v litém stavu a proto je nutná celková znalost všech změn rozměrů v průběhu technologického toku. Je důležité znát rozměrové změny při výrobě voskového modelu, skořepiny (obalování), vytavování vosku, schnutí a žíhání skořepiny a dále po nalití tekutého kovu (odolnost formy vůči tlaku tekutého kovu a vlastní objemové změny kovu při jeho tuhnutí). Musí být dále zohledněn i faktor tvarový, kdy rozměrové změny je nutno posuzovat vždy třídimenzionálně – jiné hodnoty smrštění délky, šířky a tloušťky.

Významnými fázemi z pohledu rozměrových změn jsou:

- výroba voskového modelu
- zhotovení keramické formy
- tuhnutí a chladnutí odlité slitiny

Fáze I: matečná forma – voskový model

Rozměrovou a dosažitelnou přesnost matečné formy docílíme správně zvolenou technologií její výroby. Konečné rozměry a dosažitelná přesnost voskových modelů závisí na výrobě voskového modelu (nejčastěji vstřikováním) a na parametrech vstřikování – teplota, doba plnění, vstřikovací cyklus a vstřikovací tlak. Tyto parametry a jejich následné změny jsou jedinou možností, které mohou ovlivnit konečné rozměry voskových modelů a tudíž i konečného odlitku.



Obr. 1.17 Faktory ovlivňující rozměry ve fázi matečná forma – voskový model (13)

Rozměrová přesnost voskových modelů

Při výrobě odlitků v požadované toleranci, je nutné vyrábět voskové modely, které se budou pohybovat v předpokládaných mezích. Výsledný rozměr a dosažení rozměrové tolerance daného voskového modelu je ovlivněna těmito 3 faktory:

- typem použitého vosku
- tvarem a rozměry součásti (rozložením teplotního pole při tuhnutí voskového modelu)
- způsobem výroby voskového modelu (parametrem odstřiku)

A - Vliv typu použitého vosku

Smrštivost (při chladnutí) a roztažnost (při ohřevu) je závislá na struktuře a složení voskové směsi. Jak již bylo zmíněno průběh roztahování a smršťování vosku není v intervalu od 20°C do teploty tavení lineární, ale mění se v teplotním rozsahu podle struktury.

B - Vliv tvaru a rozměru součásti

Velikost hodnoty lineárního smrštění vosku, je potřeba brát jako orientační údaj podobně jako u odlévané slitiny. Skutečné hodnoty smrštění v základních rovinách – délka, šířka, výška závisejí na tvaru a velikosti součásti.

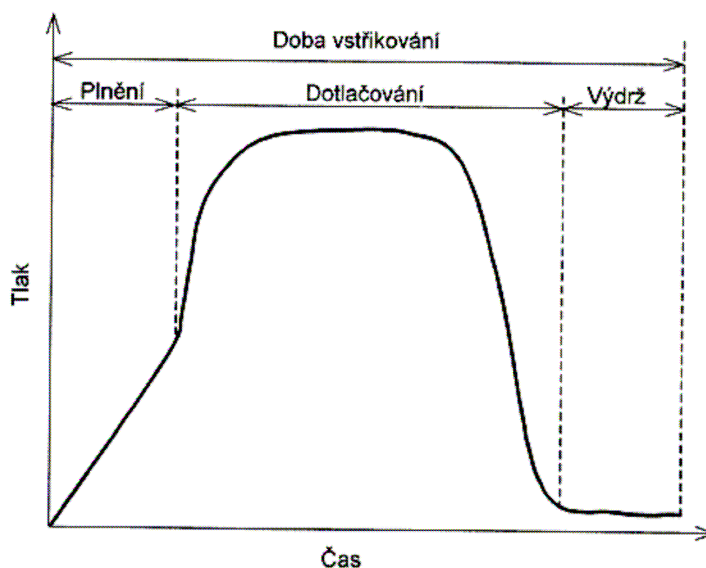
Teplotní pole v soustavě MATEČNÁ FORMA – VOSKOVÝ MODEL je ovlivňováno:

- teplotou vstřikovaného vosku
- konstrukcí vtokové soustavy
- systémem chlazení matečné formy
- velikostí a tvarem voskového modelu

C - Vliv způsobu výroby voskového modelu

Převážná část voskových modelů se vyrábí na vstřikolisech. Pod pojmem způsob výroby rozumíme způsob přivedení vosku do dutiny matečné formy a především parametry vstřikování, z nichž hlavní úlohu mají:

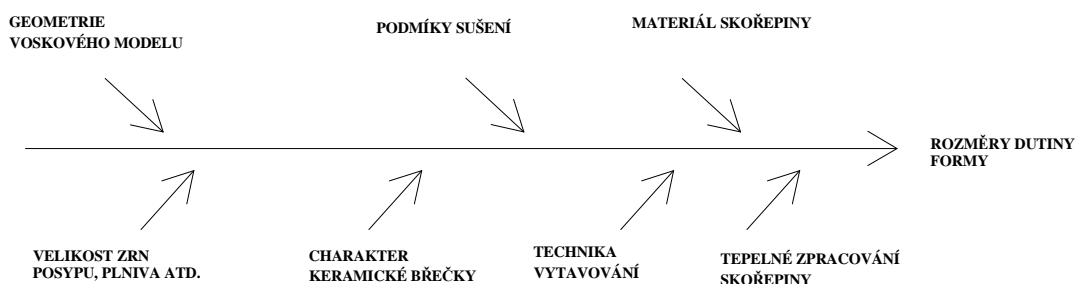
- teplota vstřikovaného vosku
- teplota matečné formy (počáteční teplota a způsob chlazení v průběhu tuhnutí vosku)
- vstřikovací tlak vosku
- rychlost vstřikování
- velikost a doba působení dotlaku
- doba prodlevy (od ukončení dotlaku do otevření matečné formy)



Obr. 1.18 Parametry vstřikování (1)

Fáze II: voskový model – skořepinová forma

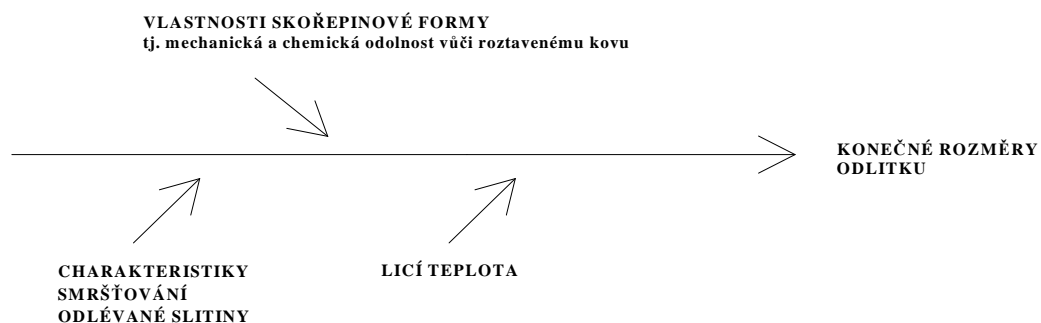
Změny v rozměrech jsou dány typem použité keramiky (posypu a pojiva), počtem použitých obalů a předepsaným způsobem tepelného zpracování jako je sušení a žíhání. Nelze opomenout vliv použité technologie při vytavování vosku ze skořepiny.



Obr. 1.19 Faktory ovlivňující rozměry ve fázi voskový model – skořepinová forma (13)

Fáze III: skořepinová forma – odlitek

Při odlévání kovu do skořepinové formy je smrštění slévárenské slitiny dáno jejím chemickým složením a zvolenou teplotou lití. Její optimální hodnota závisí na velikosti, tvaru odlitku. Je vhodné, aby byla udržována v poměrně úzkém rozmezí s ohledem na možný výskyt vad (nezaběhnutí stažení atd.)



Obr. 1.20 Faktory ovlivňující rozměry ve fázi skořepinová forma – odlitek (13)

1.5.3 Shrnutí fází na přesnost metody vytavitelného modelu

Z rozboru jednotlivých fází technologie vytavitelného modelu je zřejmé, že pouze jedinou praktickou možností řízeného ovlivnění polohy tolerančního pole výsledného odlitku je ovlivnění rozměrů voskového modelu změnou vstupních parametrů při výrobě (typ použitého vosku, parametry vstřikování- teplota vosku, vstřikovací tlak, rychlost plnění, doba dotlaku , tvar a zaústění vtoku a chlazení matečné formy).

U následných výrobního postupu (při zhotovení skořepinové formy a vlastního odlévání) jsou rozměrové změny dány typem použitých materiálů a zvolenou technologií. Je nutné zajistit co nejvyšší stabilitu výrobních parametrů (jakost vstupních surovin, stabilitu použité technologie) a tím dosažení nejúžších rozměrových tolerancí.

2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

2.1 Cíle experimentů

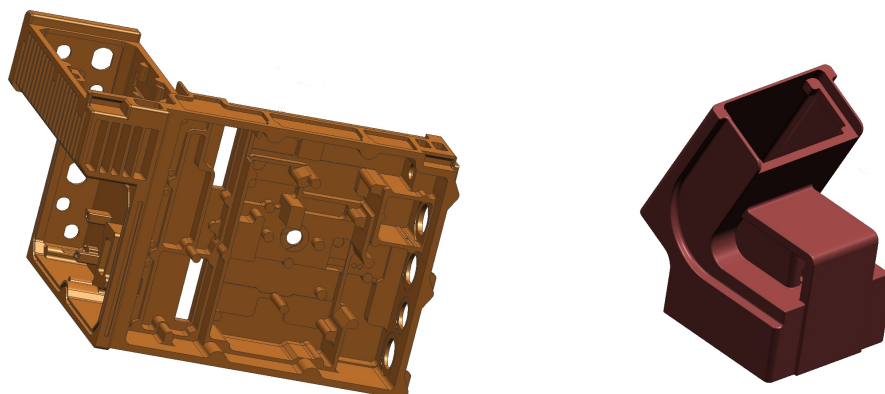
Cílem experimentální části bylo stanovit dosažení rozměrových tolerancí v jednotlivých fázích technologie přesného lití na vybraných odlitcích v podmínkách slévárny Fimes a.s.

2.2 Technologický postup výroby ve firmě Fimes a.s.

2.2.1 Výroba matečné formy

Slévárna Fimes, a.s. vyrábí matečné formy ve vlastní nástrojárně. Vlastní nástrojárna umožňuje rychlou výrobu nových forem a následnou opravu a úpravu již vyrobených forem. V některých případech si dodává zákazník svou vlastní formu, která musí být upravena tak, aby odpovídala požadavkům pro zhotovení modelu (odvzdušňovací otvory, plnicí otvory pro vstříknutí vosku atd.).

Konstrukcí v počítačovém programu Unigraphics 4 dochází k vytvoření modelu odlitku a výrobního programu pro NC stroje, který se spolu s výkresovou dokumentací jednotlivých částí předá nástrojárně a ta formu vyrobí. Matečné formy se vyrábí z duralového materiálu různými metodami obrábění. Duralový materiálu jsou vhodné pro výrobu voskových modelů svou trvanlivostí a kvalitou. Nižší hmotnost duralu umožňuje snadnou manipulaci při rozebírání formy. Z důvodu vlivu smrštění vosku jsou rozměry matečné formy větší než rozměry voskového modelu.



Obr. 2.1 Počítačové modely odlitků

2.2.2 Příprava voskové směsi

Kvalitní modelová hmota je základním předpokladem kvalitních voskových modelů. Proto je nutné věnovat přípravě a kontrole modelové hmoty zvýšenou pozornost.

Voskové modely byly zhotoveny z jedné modelové směsi, která je kompletně připravena dodavatelem. Jedná se o voskovou směs SPW/06, jejichž vlastnosti jsou uvedeny v **tab. 2.1**

Tab. 2.1 Přehled technologických vlastností vosku SPW/06

Bod tuhnutí [°C]	53-57
Bod tavení [°C]	65-80
Bod skápnutí [°C]	68-74
Penetrace [10^{-1} mm]	13-18
Obsah popelovin [%]	max. 0,10

Modelová směs se vložila do tavicí vany a spustí se parní ohřev. Roztavená směs nesmí překročit teplotu 90 °C – kontrola probíhá teplom ěrem. Směs se řádně promíchá.

Vosková směs pro výrobu se připravuje v tavicí vaně, do které se vloží krychle starého vosku zbavené usazených nečistot a vody. Spuštěním parního ohřevu dochází k roztavení vloženého vosku a k odpaření vody. Po 1 hodině intenzivního vaření vosku a 1 hodině odstátí se zbývající voda a usazené nečistoty odpustí spodním ventilem na dně vany. Ustálený vosk se nabere a přelije se do pracovní vany. Připravená modelová směs se odebírá k výrobě voskových modelů.

2.2.3 Regenerace vosku

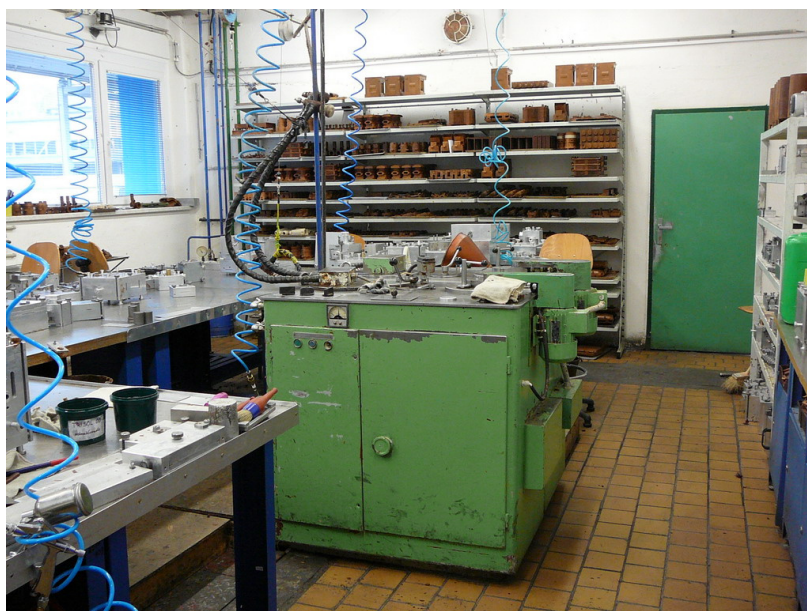
Regenerace je nutná, protože vosk po vytavení ze skořepin nelze použít pro výrobu voskového modelu. Je nutné odstranit nečistoty a vodu, která se do vosku dostala během vytavování v bojlerklávu. Vytavený vosk z bojlerklávu se přelívá do kónusových van, kde se nechá ztuhnout. Ztuhlý vosk se z chladicí vany vyklopí a slije se odloučená voda a ze spodní části se odstraní seškrábnutím usazené nečistoty. Tyto krychle jsou použity k opětovnému tavení. K oživení a zlepšení vlastností se přidává do regenerátu podle potřeby 10–20 % nového vosku. Voskovou směs je nutno řádně promíchat. **[16]**



Obr. 2.2 Regenerace vosku

2.2.4 Zhotovení voskových modelů

Voskové modely byly zhotoveny již z dříve uvedené modelové směsi na plniče vosku UP11 (viz. **obr. 2.3**).

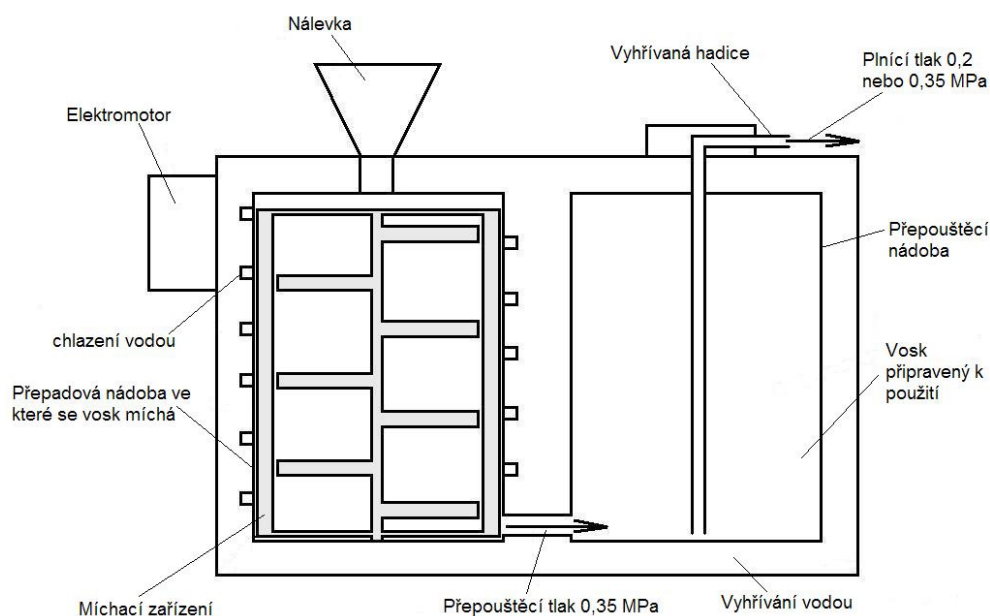


Obr. 2.3 „plnička“ vosku UP11

Jedná se o produktivní výrobu voskových modelů s ručním rozebíráním forem. Z pracovní vany se předem odměřené množství vosku o teplotě 84 °C přelije pomocí nálevky s jemným sítem do otvoru plničky vosku UP11. Odměřené množství je dáno přepadovým otvorem do přepadové nádrže, který

bývá ucpán voskovou směsí, a proto je nutné nalívat předem odměřené množství voskové směsi.

Následně je zapnuto míchání voskové směsi trvající 15 – 18 minut za současného chlazení. Vznikne navzdušněná modelová směs, která je přepuštěna stlačeným vzduchem 0,35 MPa do přepouštěcí nádoby. V tomto okamžiku je první nádoba prázdná a můžeme v ní připravit další dávku voskové směsi. Z přepouštěcí nádoby o teplotě $53,5 \pm 2$ °C prochází vosková směs vyhřívanou hadicí a je plněna pod tlakem 0,2 – 0,35 MPa do jednotlivých forem na pracovním stole. [17]



Obr. 2.4 Schéma „plničky” vosku UP11

Forma se rozebere a vyčistí se dutina. Dutina se natře separačním prostředkem. Přebytek separačního prostředku se vyfoukne stlačeným vzduchem. Matečná forma se složí a naplní se plnicím otvorem. Po ztuhnutí voskového modelu se forma rozebere a vyjme se voskový model a uloží se na podložku. **[18]**

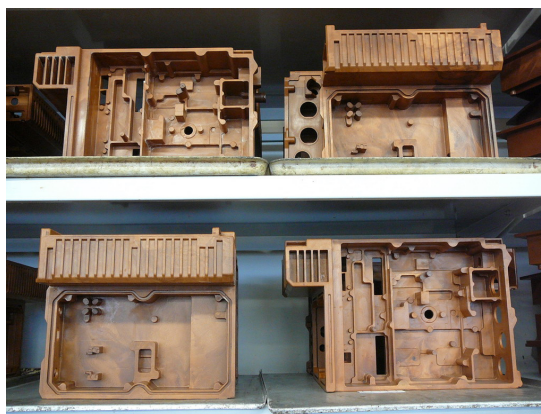


Obr. 2.5 Rozebírání forem

Místnosti, kde dochází k manipulaci voskových modelů jsou klimatizovány na 23 °C.

2.2.5 Stabilizace voskových modelů

Stabilizace je nutná, protože po vytažení voskových modelů z matečné formy dochází ke smršťování rozměrů proto je nutno modely nechat ustálit ve stabilizačních místnostech. Modely jsou uloženy na podložkách, aby nedošlo k tvarové deformaci.

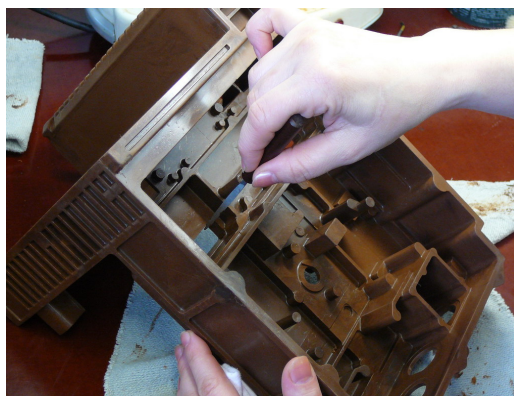


Obr. 2.6 Stabilizace voskových modelů

2.2.6 Hrotování voskových modelů

Odstříknutý voskový model je třeba před dalším zpracováním pečlivě začistit. Zbytky vosku v dělicí rovině a otřepy se musí hrotovat. Hrotování se musí provádět pečlivě, aby nedošlo k poškození nebo deformaci modelu. Po hrotování se provádí vizuální kontrola modelu a vzniklé nerovnosti na povrchu se zakápnou voskem, popřípadě se přečistí nahřátou měkkou látkou.

Jestliže se voskový model skládá z více částí, musí se jednotlivé části slepit. Slepění se provádí zahřátým nožem, který je nahříván na elektrickém vařiči. Začištěné modely se odmastí lihovým čisticím prostředkem a uloží se na rovnou odmaštěnou podložku. [19]

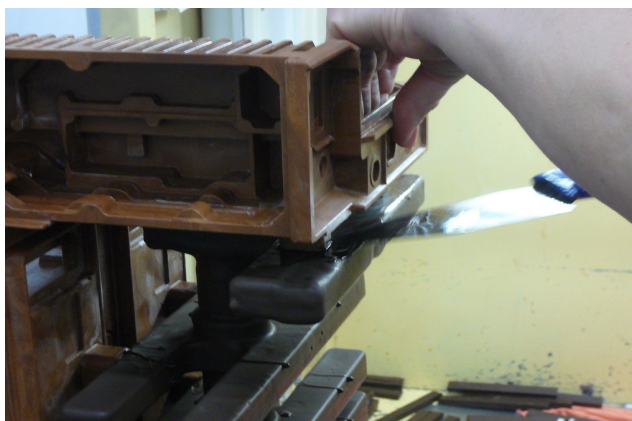


Obr. 2.7 Hotování voskového modelu

2.2.7 Sestavení voskových modelů do stromečků

Podle voskového modelu se vybere vhodný typ vtokové soustavy z katalogu vtokových soustav. Na sestavovací trn se nasadí jednotlivé části vtokové soustavy, na nálevku se zasune pryžová a kovová podložka a stromeček se stáhne pomocí držadla. Krycí víčko se nasadí na hlavu sestavovacího trnu a následně se stromeček smočí v roztaveném vosku. Po ztuhnutí první vrstvy se namočí stromeček podruhé.

Voskové modely se lepí v omezeném množství a ve vhodné poloze na vtokovou soustavu pomocí nože nahřátého na elektrickém vařiči. Vhodná poloha zajišťuje odřezání odlitku od vtokové soustavy. Stromeček se vloží na vozík. [20]



Obr. 2.8 Lepení voskového modelu

Před obalováním se stromečky musí nejprve odmastit čistícím prostředkem a poté ponořit do čisté vody. Po očištění se stromeček vloží na vozík a převezde se do sušárny k sušení.

2.2.8 Obalování stromečků

Nejdůležitějším uzlem v technologii přesného lití je operace obalování. Povrchové vady jako výrony, zálupy, zadržování jsou zapříčiněny převážně nekvalitně provedenou operací obalování. Parametry obalování jsou uvedeny v **tab. 2.2**

Tab. 2.2 Parametry obalování

POČET OBALŮ	KERAMICKÁ BŘEČKA	POSYP	SUŠENÍ		DOBA SUŠENÍ
			RELATIVNÍ VLHKOST	TEPLOTA	
1. OBAL	GRANISOL 30 + MOLOCHIT 200	MOLOCHIT 50/80	40%	23±2°C	7 - 7,5 hodin
2. OBAL	GRANISOL 30 + MOLOCHIT 200	MOLOCHIT 50/80	40%	23±2°C	21,5 hodin
3. OBAL	GRANISOL 25 + MOLOCHIT 200	MOLOCHIT 18/36	50%	23±2°C	20 hodin
4. OBAL	GRANISOL 25+ MOLOCHIT 200	LUPEK A111VHR 0,6-1 mm	50%	23±2°C	12 hodin
5. OBAL	GRANISOL 25 + MOLOCHIT 200	LUPEK A111VHR 0,6-1 mm	50%	23±2°C	8 - 9 hodin

K obalování stromečku se používá vazná kapalina Granisol 25 a 30 na bázi vody. Vazná kapalina je kompletně připravena dodavatelem a není ji potřeba nijak upravovat. Před každým použitím se vodní pojivo řádně promíchá, protože jednotlivé složky se mohou usazovat, což má za následek nestabilní vlastnosti vazné kapaliny.

Keramická břecha se připravuje v míchací kovové nádobě, kde se vpustí potřebné množství vazné kapaliny a postupně se přidává Molochit o zrnitosti 0-0,75 mm. Břecha se musí řádně promíchat a nechat minimálně 24 hodin vyzrát. Po vyzrání se břecha promíchá a zředí vaznou kapalinou na požadovanou hustotu. Hustota keramické břechy se kontroluje Fordovým pohárkem č.6 (viz.**obr. 2.9**)



Obr. 2.9 Fordův pohárek

Břecha se ředí pouze přidáváním vazné kapaliny. Zahušťování břechy přidáváním moučky není povoleno, protože hrozí vmíchání vzduchových bublinek do břechy a neslinutí moučky s vaznou kapalinou a vzniku neshodných výrobků.

Před obalováním se musí zkontrolovat, zda jsou stromečky dobře vysušeny po odmašťování. Takto vysušené stromečky se musí ještě temperovat 1 hodinu v sušárně. Čisté a suché voskové stromečky, temperované na teplotu pracoviště se obalovaly podle **tab. 2.2**

Stromečky se namáčejí pomalým ponořením do keramické břechy při současném otáčení a naklání tak, aby obalová směs stromeček rovnoměrně pokryla a aby se netvořily v koutech, rozích nebo drážkách vzduchové bubliny. (obr. 2.10). Doba ponoru závisí na složitosti modelů a množství drážek otvoru atd. Stromeček se vyjme z obalovací směsi a otáčí se s ním tak, aby se směs rovnoměrně rozdělila po celém povrchu modelu a přebytečná směs odkapala zpět do nádoby s břechou. Film vytvořený na povrchu stromečku musí mít pokud možno stejnou tloušťku.



Obr. 2.10 Obalování

První obal vyžaduje kratší dobu ponoru i odkapání než další obaly, které se musí ponechat v obalovací směsi delší dobu, aby se náležitě zvlhčily a následující obal dobře přilnul k předcházejícímu. Po vyjmutí stromečku z obalové směsi a odkapání se stromeček posype pískem předepsané zrnitosti (viz. **tab. 2.2**). Provádí se zasunutím stromečku do fluidní nádoby s načeřeným pískem a natočením tak, tak aby se celý povrch stromečku rovnoměrně obalil (viz. **obr. 2.11**).



Obr. 2.11 Fluidní posyp

Po obalení celého vozíku se vtlačí do sušící klimatizované místnosti, kde se skořepina suší. Nesmí dojít k velkým výkyvům teplot. Optimální podmínky jsou uvedeny v **tab. 2.2**

Jestliže je předepsáno více obalů než je uvedeno v **tab. 2.2**, použijí se pro další obaly parametry jak pro 5. obal. [21]

2.2.9 Vytavování vosku

Vytavování vosku se provádí v bojlerklávu. Před vytavováním je nutné u každého stromečku vyšroubovat rukojeť sestavovacího trnu, odstranit kovovou a pryžovou podložku. Pomocí nože se musí odstranit keramika, která přesahuje přes dutinu lící nálevky. Připravený stromeček se vloží na vozík bojlerklávu hrdlem dolů tak, aby byl dokonale stabilní a nedošlo k poškození skořepiny při manipulaci s vozíkem. Po naplnění se vozík zaveze do bojlerklávu.

Bojlerkláv má náběh páry na tlak 0,6 MPa za 2,8 s. Maximální hodnota pracovního tlaku je 1,1 MPa. Doba vytavování je 10 min. Po uplynutí vytavovací doby se bojlerkláv otevře a vozík se vytlačí z bojlerklávu ven. Stromečky z bojlerklávu se odebírají postupně a opatrně tak, aby do dutiny formy nemohly napadat nečistoty z okraje skořepiny. Stromečky se uloží na regály. [22]



Obr. 2.12 Vytavování vosku

2.2.10 Žihání skořepinových forem

Skořepina se může zakládat do žihací pece, pokud je dobře proschlá (tzn. min. 24 hodin po vytavení z bojlerklávu). Skořepina se zakládá do žihací pece, která nemá vyšší teplotu než 150°C. Nedodržení těchto zásad může mít za následek poškození nebo zničení skořepinové formy. Stromečky se zakládají do žihací pece tak, aby je bylo poté možno vyjmout pomocí manipulačního přípravku a nedošlo k jejich poškození. Žihání skořepinových forem je prováděno automaticky podle nastavného programu. [23]



Obr. 2.13 Žihání skořepiny

2.2.11 Odlévání

Fimes a.s. je slévárnou, která odlévá několik druhů neželezných kovů (slitiny hliníku, barevné kovy). Tavby slitin hliníku v této slévárně jsou prováděny na elektrických odporových pecích. Pro natavení materiálu jsou používány dvě sklopné pece o obsahu 350 kg a tři stacionární pece, z nichž 2 pece mají obsah 210kg a jedna pec 250kg.

Při přípravě nové taveniny se na dno kelímku vloží kusový odpad (vrat), na něj se přidá nový materiál. Poměr vratu a k novému materiálu se stanovuje individuálně podle složitosti a požadavku na odlévané odlitky. Vrat nesmí přesahovat 80% obsahu pece.

Pro lepší tvorbu jemnozrnné struktury, zvýšení mechanických vlastností a snížení množství vodíku v tavenině, který je příčinou vzniku bublin v odlitku se provádějí následné operace tj. rafinace, modifikace, očkování a odplynění. Podle typu odlévané slitiny se pohybují lící teploty mezi 720-730 °C. Z každé tavby se provádí chemický rozbor a termická analýza. [24]



Obr. 2.14 Odlévání

2.2.12 Čištění odlitků

Hliníkové odlitky jsou tryskány pro odstranění zbytků skořepiny.

Odlitky mohou být tryskány:

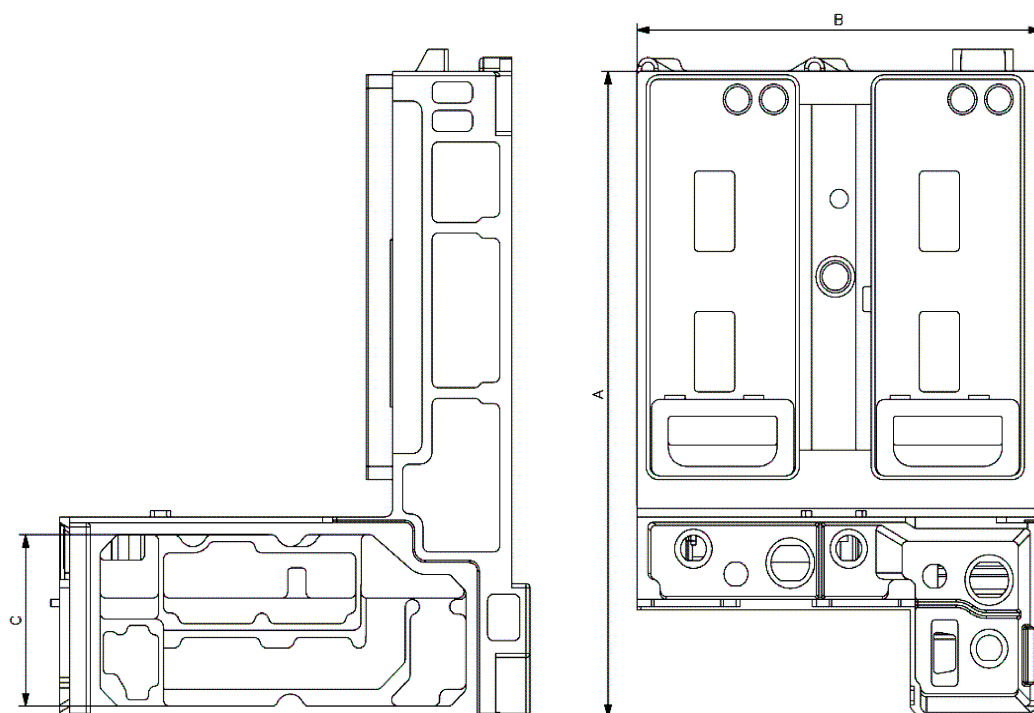
- korundem
- nerezovou drtí
- ocelovou drtí

Následně jsou odlitky tepelně zpracovány a kalibrovány.

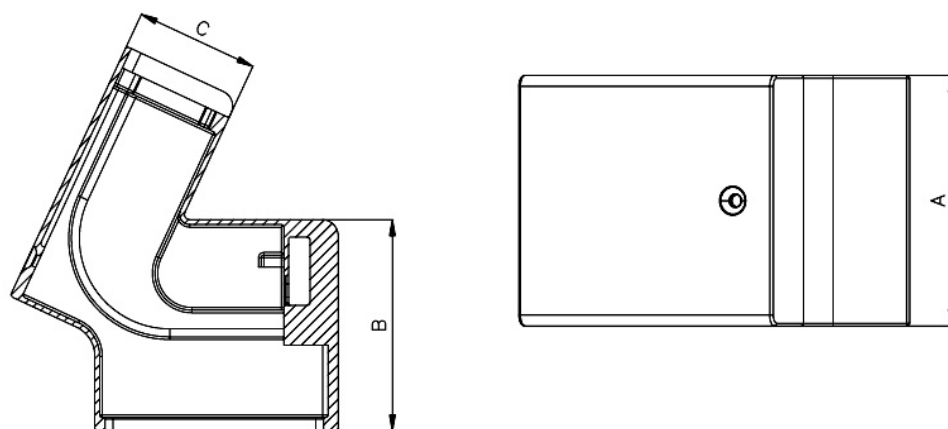
2.3 Metodika měření

2.3.1 Měřená součást

Ze širokého sortimentu výrobků slévárny Fimes a.s, byly vhodně vybrány dva odlitky různého tvaru, velikosti a složitosti. Odlitky byly označeny jako SOUČÁST 1 a SOUČÁST 2. Na odlitcích byly po dohodě se zákazníkem zvoleny kritické rozměry, které byly nejdříve změřeny na matečné formě, a poté na ně byla kladena pozornost při provádění experimentů v celém průběhu výroby (voskový model, hotový odlitek).



Obr. 2.15 Zvolené rozměry u odlitku SOUČÁST 1



Obr. 2.16 Zvolené rozměry u odlitku SOUČÁST 2

Tab. 2.3 Rozměry matečné formy SOUČÁST 1

Rozměr [mm]		
A	B	C
309,60	203,30	82,54

Tab. 2.4 Rozměry matečné formy SOUČÁST 2

Rozměr [mm]		
A	B	C
93,33	80,17	46,66

SOUČÁST 1 a SOUČÁST 2 byly vyrobeny ze slitiny EN 1706 AC-42100. SOUČÁST 1 a SOUČÁST 2 byly odlévány z různých taveb. SOUČÁST 1 byla odlévána z tavby č. 247. Chemické složení slitiny z tavby č. 247 je uvedeno v **tab. 2.4**. Materiál byl odléván při teplotě 720 ± 5 °C

Tab. 2.5 Chemické složení slitiny EN 1706 AC-42100 z tavby č.247

Prvek	Al	Si	Fe	Mg	Mn	Zn
Obsah [%]	92,26	7,01	0,15	0,36	0,02	0,02
Prvek	Cu	Ti	Pb	Cr	Ni	Sn
Obsah [%]	0,03	0,15	0	0,003	0	0

SOUČÁST 2 byla odlévána z tavby č. 268. Chemické složení slitiny z tavby č. 268 je uvedeno v **tab. 2.4**. Materiál byl odléván při teplotě 720 ± 5 °C

Tab. 2.6 Chemické složení slitiny EN 1706 AC-42100 z tavby č.268

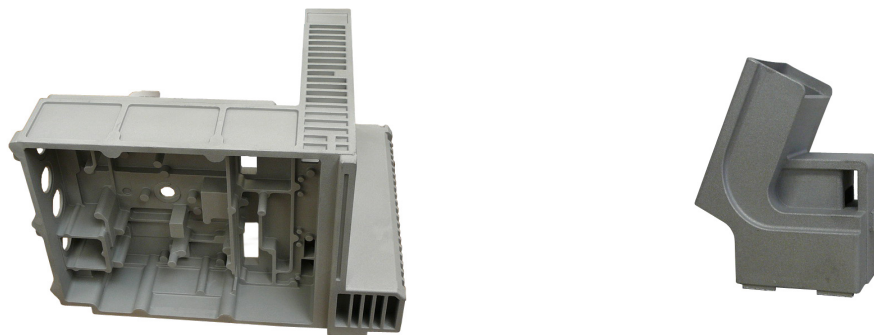
Prvek	Al	Si	Fe	Mg	Mn	Zn
Obsah [%]	91,75	7,49	0,15	0,44	0,01	0,02
Prvek	Cu	Ti	Pb	Cr	Ni	Sn
Obsah [%]	0,02	0,15	0	0,003	0	0

2.3.2 Rozměrové změny v průběhu technologie

V průběhu výroby odlitků metodou vytavitelného modelu dochází ke změnám rozměrů, které jsou různé v každé fázi technologie. Charakteristické rozměry zvolených odlitků byly kontrolovány v jednotlivých fázích výroby.

Jednotlivé fáze, ve kterých byly rozměry kontrolovány:

- rozměr voskového modelu - těsně po odstříknutí
 - 2 hodiny po odstříknutí
 - den po odstříknutí
 - 7 dní po odstříknutí
- rozměr odlitku po tryskání



Obr. 2.17 Odlitky po tryskání

2.3.3 Měřicí přístroje

Délkové rozměry byly měřeny digitálním posuvným měřidlem s přesností 0,01 mm

2.4 Měření rozměrové přesnosti

2.4.1 Metodika výpočtu pravděpodobnostního intervalu

Pro stanovení pravděpodobnostního intervalu u voskových modelů byl použit jako názorná ukázka rozměr „A” voskového modelu SOUČÁST 1

1. Vypočítá se průměr ze všech naměřených hodnot voskových modelů

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum x_i = \dots\dots = 309,33 \text{ mm}$$

2. Vypočítá se rozptyl výběrového souboru

$$s^2 = \frac{1}{n} \cdot \sum \left(x - \bar{x} \right)^2 = \dots\dots = 0,0007 \text{ mm}$$

3. Z výběrového rozptylu se stanoví bodovým odhadem rozptyl základního souboru

$$\sigma^2 = \frac{n}{n-1} \cdot s^2 = \dots\dots = 0,000737 \text{ mm}$$

4. Vypočteme směrodatnou odchylku základního souboru

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} = 0,027$$

5. Stanovení a definice horního mezního rozměru

$$HMR = \bar{x} + 2 \cdot \sigma = 309,33 + 2 \cdot 0,027 = 309,384$$

6. Stanovení a definice dolního mezního rozměru

$$DMR = \bar{x} - 2 \cdot \sigma = 309,33 - 2 \cdot 0,027 = 309,276$$

Výsledný toleranční zápis: 309,33±0,05

2.4.2 Naměřené hodnoty voskových modelů a odlitků SOUČÁST 1

Tab. 2.7 Naměřené hodnoty voskových modelů SOUČÁST 1

Rozměry modelů SOUČÁST 1 po vytažení z formy			
kus č.	Rozměr [mm]		
	A	B	C
	309,60	203,30	82,54
1	309,36	203,08	82,48
2	309,34	203,11	82,47
3	309,36	203,10	82,45
4	309,34	203,06	82,43
5	309,33	203,09	82,45
6	309,34	203,08	82,47
7	309,34	203,08	82,48
8	309,34	203,10	82,42
9	309,31	203,06	82,43
10	309,31	203,09	82,43
11	309,34	203,08	82,47
12	309,34	203,07	82,43
13	309,31	203,05	82,42
14	309,30	203,03	82,43
15	309,33	203,04	82,42
16	309,33	203,04	82,47
17	309,34	203,05	82,42
18	309,31	203,06	82,42
19	309,35	203,08	82,43
20	309,35	203,04	82,46
x	309,33	203,07	82,44
Smrštění [%]	- 0,086	- 0,113	- 0,116

Tab. 2.8 Naměřené hodnoty voskových modelů SOUČÁST 1

Rozměry modelů SOUČÁST 1 po 2 hodinách			
kus č.	Rozměr [mm]		
	A	B	C
	309,60	203,30	82,54
1	309,22	202,95	82,39
2	309,18	202,98	82,36
3	309,22	202,96	82,39
4	309,21	202,95	82,39
5	309,22	202,98	82,38
6	309,21	202,96	82,39
7	309,19	202,96	82,38
8	309,21	202,95	82,39
9	309,18	202,98	82,39
10	309,18	202,99	82,36
11	309,19	202,96	82,36
12	309,21	202,98	82,39
13	309,22	202,95	82,36
14	309,19	202,96	82,36
15	309,18	202,98	82,36
16	309,19	202,98	82,40
17	309,21	202,95	82,38
18	309,18	202,95	82,36
19	309,22	202,98	82,36
20	309,19	202,95	82,36
x	309,20	202,97	82,37
Smrštění [%]	- 0,129	- 0,165	- 0,201

Tab. 2.9 Naměřené hodnoty voskových modelů SOUČÁST 1

Rozměry modelů SOUČÁST 1 po 24 hodinách			
kus č.	Rozměr [mm]		
	A	B	C
	309,60	203,30	82,54
1	309,19	202,96	82,21
2	309,20	202,90	82,24
3	309,19	202,94	82,21
4	309,20	202,93	82,24
5	309,18	202,94	82,20
6	309,19	202,92	82,21
7	309,18	202,94	82,20
8	309,20	202,95	82,23
9	309,20	202,96	82,24
10	309,18	202,90	82,23
11	309,19	202,96	82,21
12	309,20	202,95	82,20
13	309,21	202,93	82,23
14	309,18	202,90	82,20
15	309,18	202,92	82,21
16	309,19	202,94	82,24
17	309,20	202,93	82,20
18	309,18	202,96	82,23
19	309,20	202,95	82,20
20	309,18	202,96	82,21
x	309,19	202,94	82,22
Smrštění [%]	- 0,132	- 0,179	- 0,391

Tab. 2.10 Naměřené hodnoty voskových modelů SOUČÁST 1

Rozměry modelů SOUČÁST 1 po 7 dnech			
kus č.	Rozměr [mm]		
	A	B	C
	309,60	203,30	82,54
1	309,06	202,77	82,12
2	309,12	202,78	82,10
3	309,11	202,80	82,10
4	309,09	202,78	82,09
5	309,09	202,78	82,10
6	309,07	202,84	82,09
7	309,04	202,80	82,13
8	309,08	202,80	82,13
9	309,04	202,86	82,10
10	309,08	202,82	82,12
11	309,09	202,80	82,13
12	309,05	202,78	82,10
13	309,08	202,80	82,12
14	309,10	202,79	82,09
15	309,04	202,79	82,13
16	309,07	202,78	82,12
17	309,05	202,80	82,09
18	309,05	202,88	82,13
19	309,09	202,81	82,09
20	309,08	202,89	82,12
x	309,07	202,81	82,11
Smrštění [%]	- 0,170	- 0,242	- 0,521

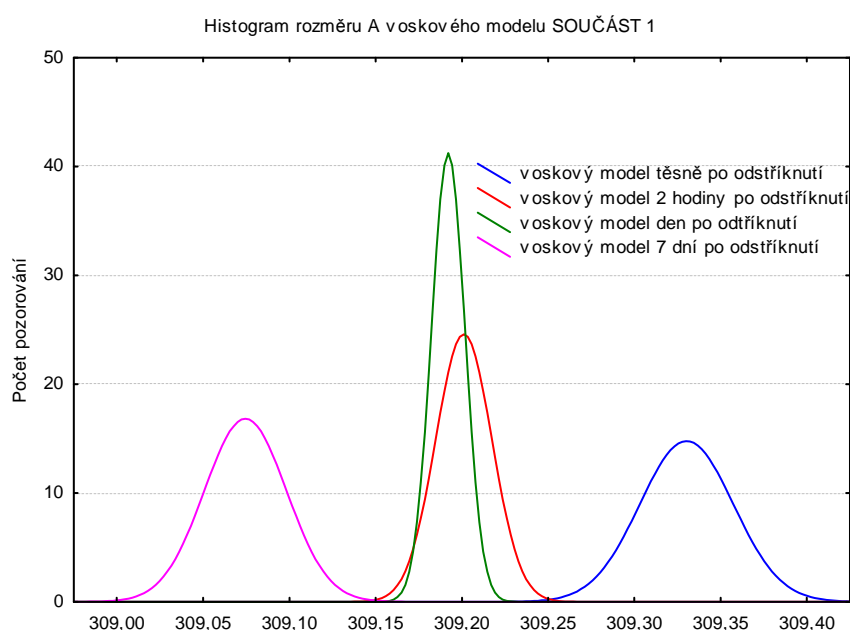
Tab. 2.11 Naměřené hodnoty odlitků SOUČÁST 1

Rozměry hotových odlitků SOUČÁST 1			
kus č.	Rozměr [mm]		
	A	B	C
	309,60	203,30	82,54
1	306,19	200,86	82,03
2	306,20	200,88	81,98
3	306,24	200,87	81,95
4	306,20	200,77	82,05
5	306,20	200,83	81,98
6	306,18	200,88	82,02
7	306,20	200,87	81,94
8	306,18	200,87	81,96
9	306,25	200,84	82,05
10	306,20	200,87	81,94
11	306,27	200,86	82,05
12	306,14	200,88	82,06
13	306,17	200,87	82,00
14	306,10	200,86	81,99
15	306,12	200,87	82,06
16	306,20	200,85	82,05
17	306,09	200,84	81,97
18	306,06	200,78	82,06
19	306,18	200,87	81,98
20	306,20	200,89	82,05
x	306,18	200,85	82,01
Smrštění [%]	- 0,937	- 0,962	- 0,124

2.4.3 Vyhodnocení rozměrů voskových modelů a odlitků SOUČÁST 1

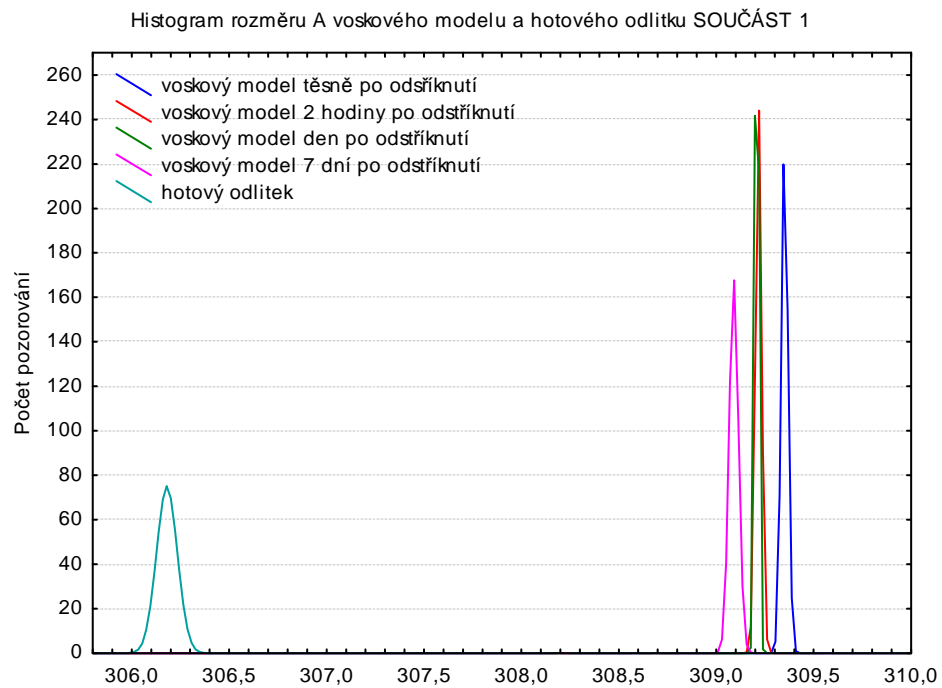
Při statistickém vyhodnocování byl každý soubor hodnot voskových modelů a hotových odlitků SOUČÁST 1 testován na hrubou chybu Grubbsovým testem. V testovaných souborech hodnot nebyly zjištěny hrubé chyby. Hodnoty chování vosku a odlitků po otryskání byly zpracovány do následujících histogramů

1. Rozměr A

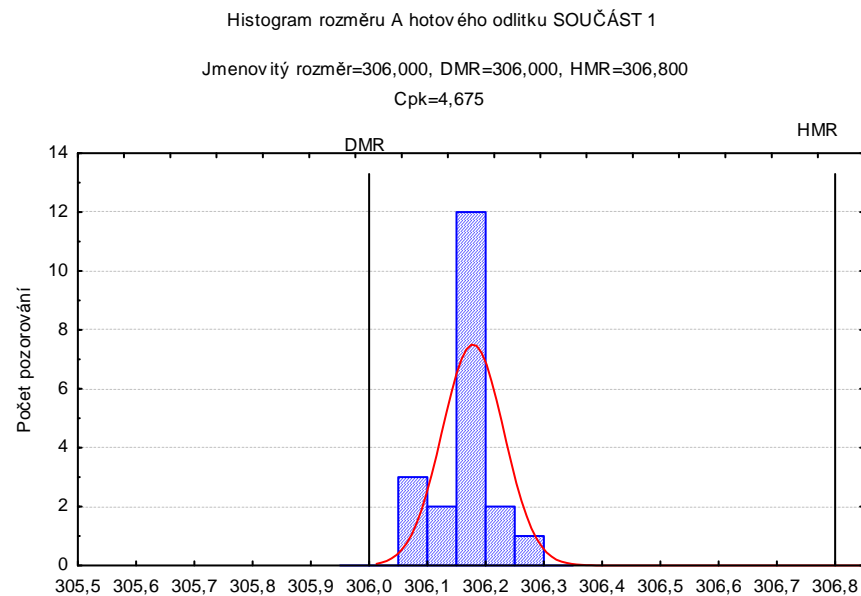


Obr. 2.18 Histogram rozměru A voskového modelu SOUČÁST 1

Na **obr. 2.18** jsou znázorněny změny rozměru A na voskových modelech v průběhu sedmi dnů. Během této doby se rozměr A voskového modelu smrštil o hodnotu 0,170 % (tj. v tomto případě 0,53 mm). Dále ze znázorněných histogramů je patrné, že voskové modely 2 hodiny po odstříknutí mají užší tolerance než voskové modely v době odstříknutí.



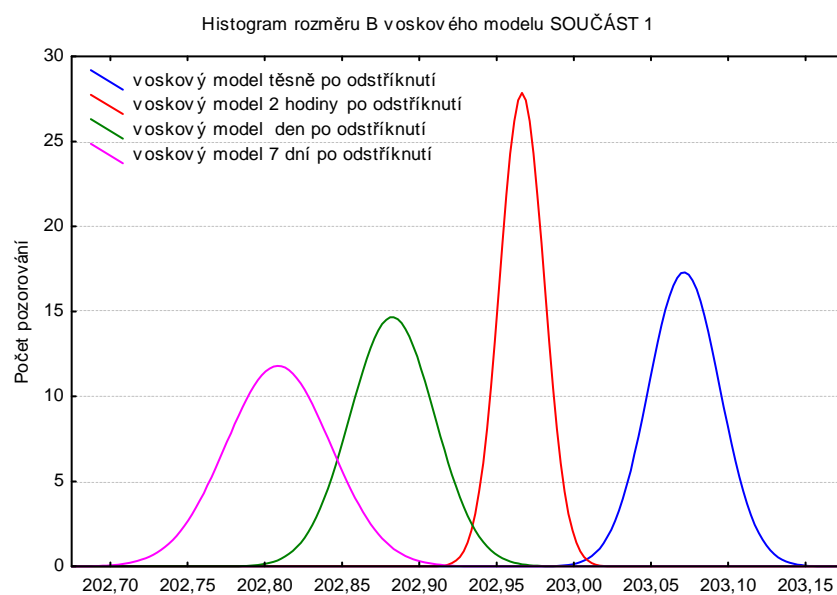
Obr. 2.19 Histogram rozměru A voskového modelu a odlitku SOUČÁST 1



Obr. 2.20 Histogram rozměru A hotového odlitku SOUČÁST 1

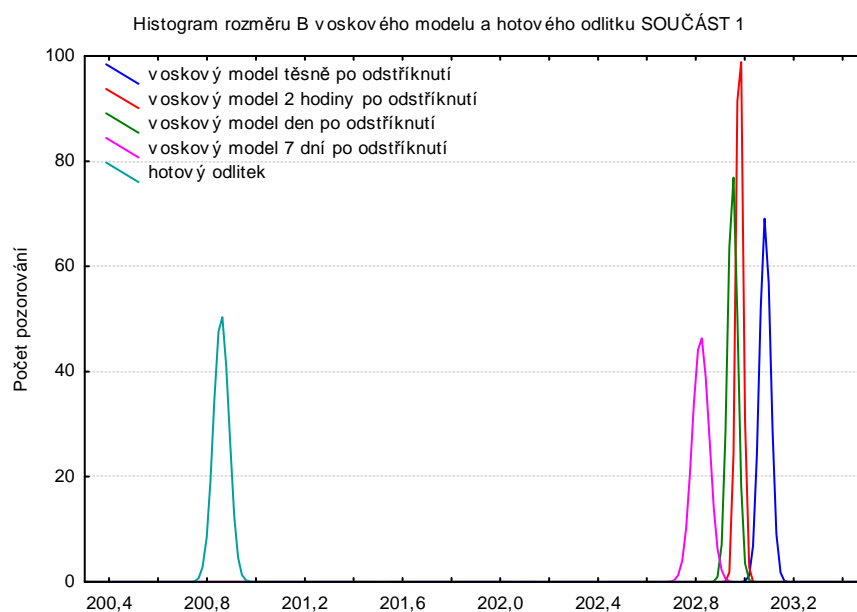
Změny rozměru A na odlitcích SOUČÁST 1 po otryskání jsou znázorněny v histogramu (viz.**obr. 2.20**). Z histogramu je vidět, že naměřené hodnoty rozměru A jsou posunuty k dolní povolené mezi.

2. Rozměr B

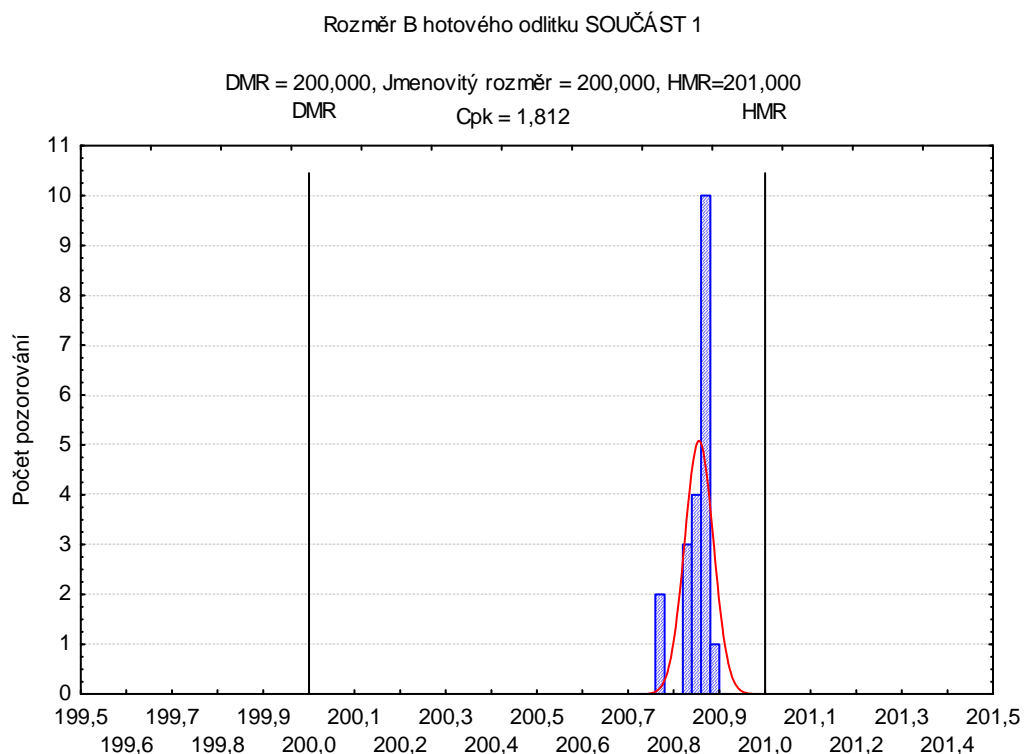


Obr. 2.21 Histogram rozměru B voskového modelu SOUČÁST 1

Změny rozměru B na voskových modelech jsou v průběhu časového období sedmi dnů znázorněny na **obr. 2.21**. V daném časovém období se rozměr B smršťil o hodnotu 0,242 % (tj. 0,49 mm)



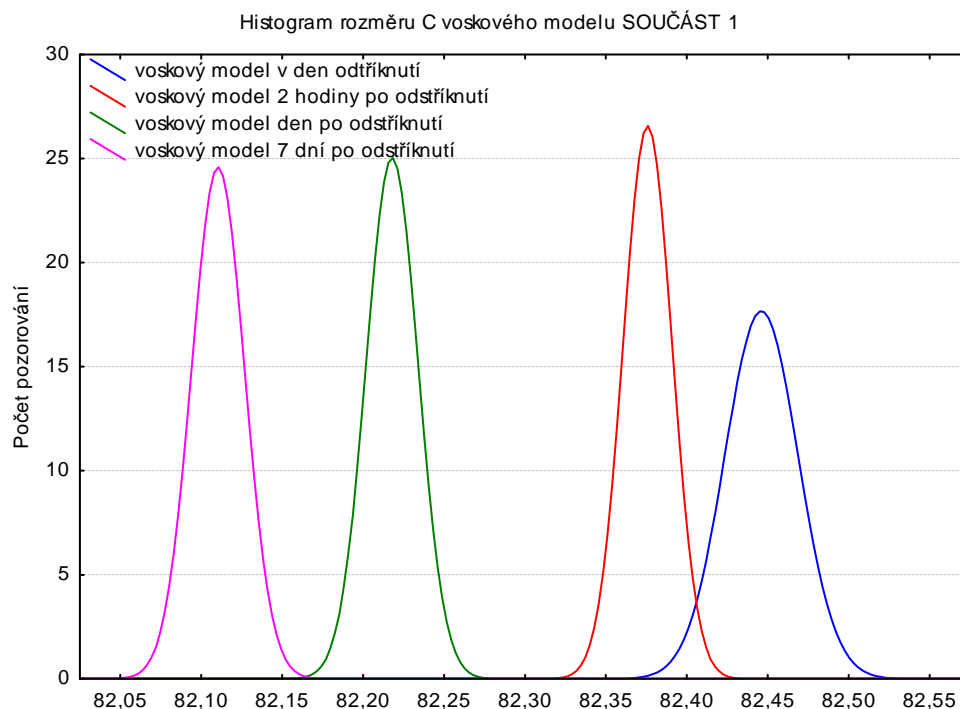
Obr. 2.22 Histogram rozměru B voskového modelu a odlitku SOUČÁST 1



Obr. 2.23 Histogram rozměru B hotového odlitku SOUČÁST 1

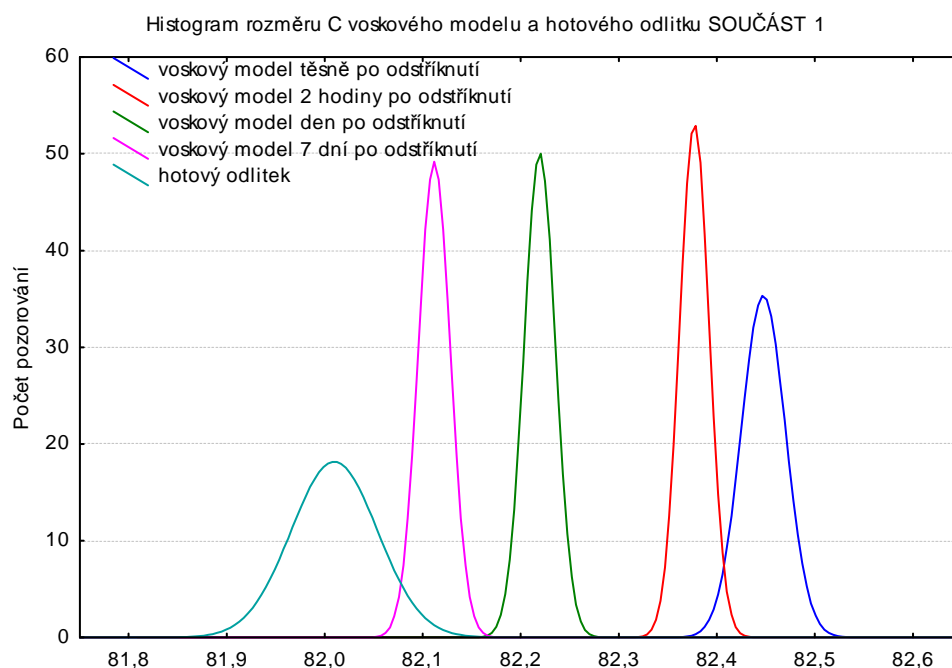
Na **obr. 2.23** jsou znázorněny změny rozměru B na odlitcích po otryskání. U toho rozměru se naměřené hodnoty naopak pohybují u horní povolené hranici rozměru.

3. Rozměr C

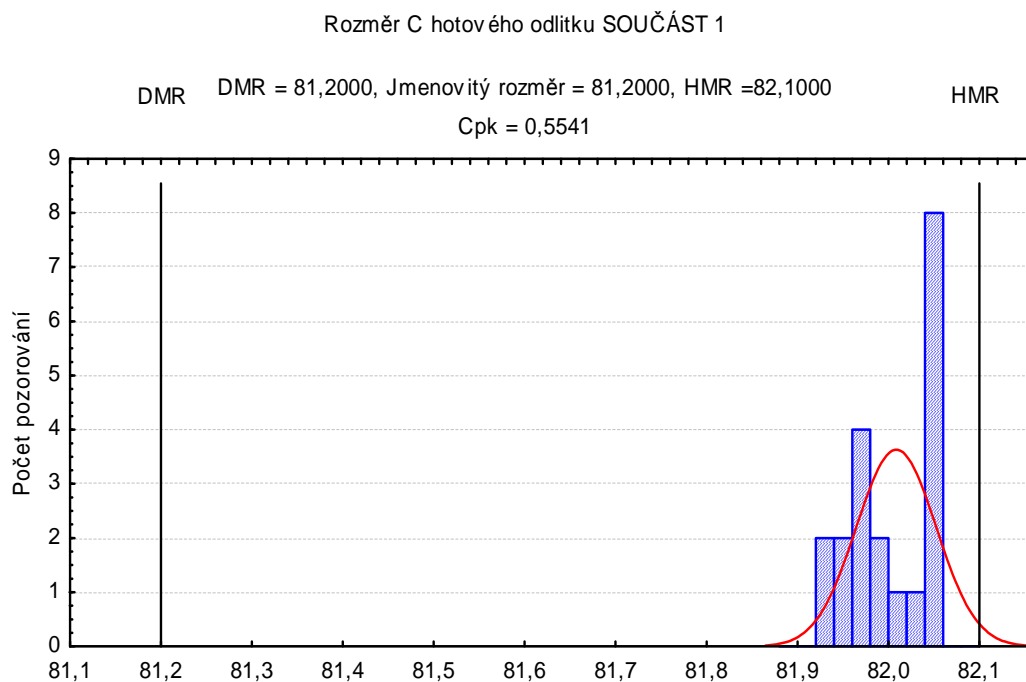


Obr. 2.24 Histogram rozměru C voskového modelu SOUČÁST 1

Při sledování změny rozměru C u voskového modelu SOUČÁST 1 jsou výsledky zobrazeny pomocí histogramu (viz. **obr. 2.24**). Z **obr. 2.24** je patrné že rozměr C voskového modelu je stabilní již po 2 hodinách. Smrštění tohoto rozměru je 0,521 % (0,42mm).



Obr. 2.25 Histogram rozměru C voskového modelu a odlitku SOUČÁST 1



Obr. 2.26 Histogram rozměru C hotového odlitku SOUČÁST 1

Při zjištění rozměrové přesnosti se sledovaly změny rozměru C u odlitku SOUČÁST 1 a zjištěné rozměry byly znázorněny pomocí histogramu. Z daného histogramu vyplývá, že rozměr C se pohybuje v horní povolené toleranci rozměru.

2.4.4 Naměřené hodnoty voskových modelů a odlitků SOUČÁST 2**Tab. 2.12** Naměřené hodnoty voskových modelů SOUČÁST 2

Rozměry modelů SOUČÁST 2 po vytažení z formy			
kus č.	Rozměr [mm]		
	A	B	C
	93,33	80,17	46,66
1	93,20	80,07	46,54
2	93,20	80,06	46,50
3	93,20	80,10	46,54
4	93,21	80,07	46,53
5	93,18	80,11	46,55
6	93,20	80,10	46,55
7	93,21	80,11	46,55
8	93,19	80,10	46,54
9	93,20	80,08	46,55
10	93,18	80,04	46,57
11	93,19	80,10	46,55
12	93,22	80,05	46,56
13	93,20	80,10	46,55
14	93,18	80,08	46,55
15	93,21	80,09	46,56
16	93,19	80,11	46,55
17	93,19	80,09	46,54
18	93,20	80,11	46,56
19	93,20	80,11	46,56
20	93,19	80,10	46,55
x	93,20	80,09	46,55
Smrštění [%]	- 0,143	- 0,104	- 0,241

Tab. 2.13 Naměřené hodnoty voskových modelů SOUČÁST 2

Rozměry modelů SOUČÁST 2 po 2 hodinách			
kus č.	Rozměr [mm]		
	A	B	C
	93,33	80,17	46,66
1	93,10	79,80	46,46
2	93,12	79,79	46,45
3	93,09	79,80	46,46
4	93,11	79,79	46,45
5	93,12	79,80	46,46
6	93,12	79,79	46,45
7	93,10	79,78	46,46
8	93,10	79,80	46,46
9	93,09	79,78	46,45
10	93,11	79,80	46,44
11	93,09	79,78	46,46
12	93,10	79,80	46,44
13	93,11	79,81	46,44
14	93,10	79,79	46,45
15	93,12	79,80	46,46
16	93,10	79,79	46,44
17	93,09	79,79	46,45
18	93,10	79,78	46,44
19	93,11	79,80	46,49
20	93,12	79,78	46,44
x	93,11	79,79	46,45
Smrštění [%]	-0,241	-0,471	-0,448

Tab. 2.14 Naměřené hodnoty voskových modelů SOUČÁST 2

Rozměry modelů SOUČÁST 2 po 24 hodinách			
kus č.	Rozměr [mm]		
	A	B	C
	93,33	80,17	46,66
1	93,10	79,78	46,36
2	93,10	79,79	46,34
3	93,11	79,78	46,35
4	93,10	79,79	46,35
5	93,11	79,79	46,36
6	93,09	79,78	46,34
7	93,11	79,78	46,34
8	93,12	79,80	46,36
9	93,10	79,78	46,35
10	93,09	79,79	46,34
11	93,08	79,78	46,36
12	93,09	79,80	46,35
13	93,11	79,77	46,34
14	93,09	79,79	46,34
15	93,09	79,80	46,36
16	93,10	79,81	46,37
17	93,08	79,79	46,35
18	93,10	79,78	46,36
19	93,11	79,80	46,36
20	93,08	79,79	46,35
x	93,10	79,79	46,35
Smrštění [%]	- 0,249	- 0,476	- 0,661

Tab. 2.15 Naměřené hodnoty voskových modelů SOUČÁST 2

Rozměry modelů SOUČÁST 2 po 7 dnech			
kus č.	Rozměr [mm]		
	A	B	C
	93,33	80,17	46,66
1	93,10	79,73	46,32
2	93,09	79,74	46,33
3	93,11	79,74	46,34
4	93,10	79,75	46,33
5	93,09	79,74	46,32
6	93,08	79,73	46,34
7	93,10	79,75	46,33
8	93,11	79,76	46,35
9	93,08	79,74	46,33
10	93,09	79,75	46,33
11	93,08	79,73	46,34
12	93,08	79,77	46,32
13	93,11	79,75	46,33
14	93,09	79,76	46,32
15	93,09	79,77	46,33
16	93,10	79,73	46,32
17	93,08	79,76	46,33
18	93,10	79,75	46,32
19	93,11	79,76	46,34
20	93,10	79,74	46,32
X	93,09	79,75	46,33
Smrštění [%]	- 0,252	- 0,527	- 0,708

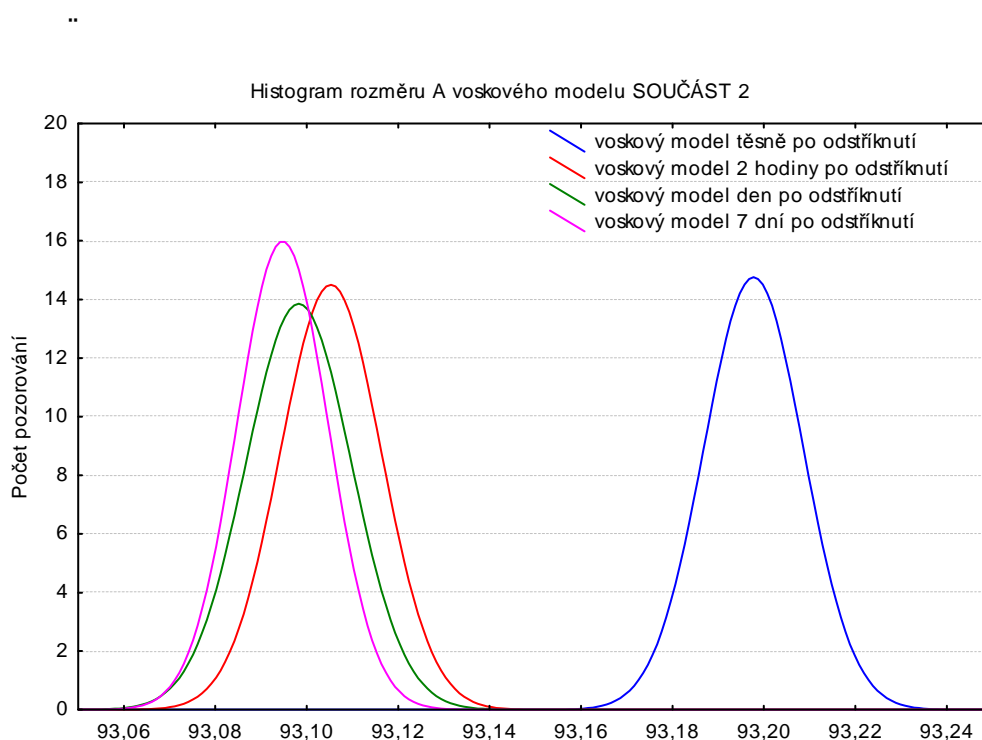
Tab. 2.16 Naměřené hodnoty odlitků SOUČÁST 2

Rozměry hotových odlitků SOUČÁST 2			
kus č.	Rozměr [mm]		
	A	B	C
	93,33	80,17	46,66
1	92,66	79,04	46,30
2	92,60	79,08	46,32
3	92,61	79,08	46,33
4	92,65	79,10	46,32
5	92,65	79,11	46,31
6	92,61	79,11	46,33
7	92,64	79,08	46,33
8	92,64	79,10	46,35
9	92,61	79,10	46,31
10	92,62	79,05	46,32
11	92,62	79,06	46,32
12	92,64	78,79	46,30
13	92,63	79,10	46,33
14	92,60	78,92	46,31
15	92,64	78,92	46,33
16	92,62	79,05	46,31
17	92,60	79,10	46,30
18	92,61	79,05	46,30
19	92,62	79,05	46,34
20	92,62	79,10	46,31
X	92,62	79,05	46,32
Smrštění [%]	- 0,505	- 0,875	- 0,025

2.4.5 Vyhodnocení rozměrů voskových modelů a odlitků SOUČÁST 2

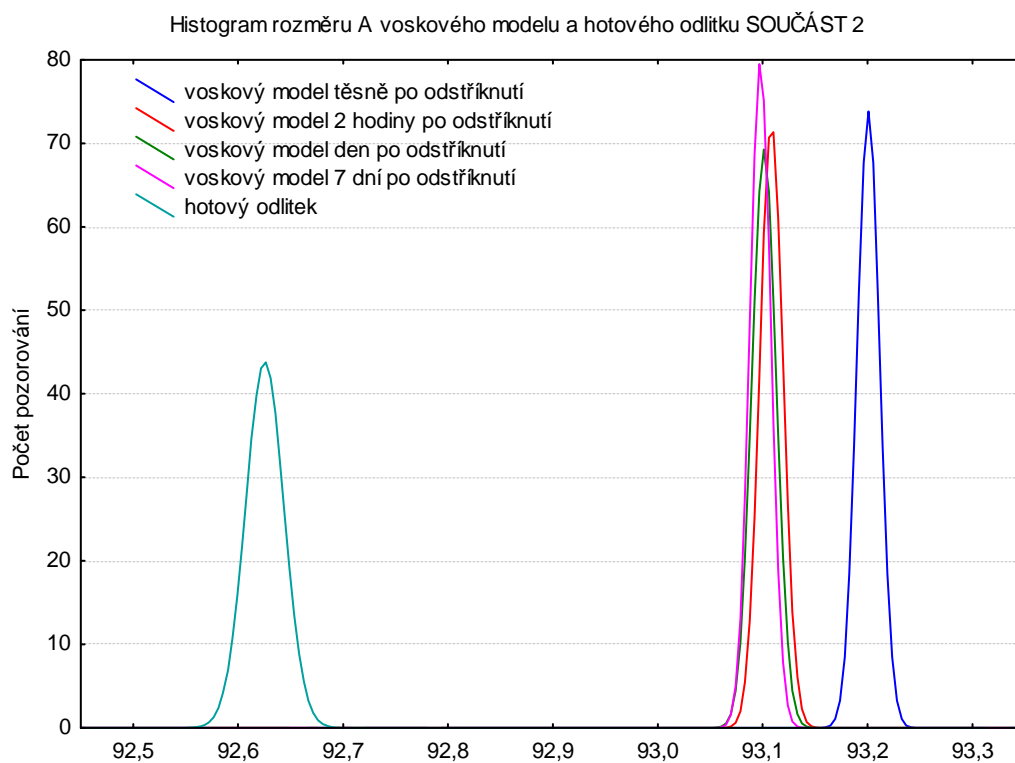
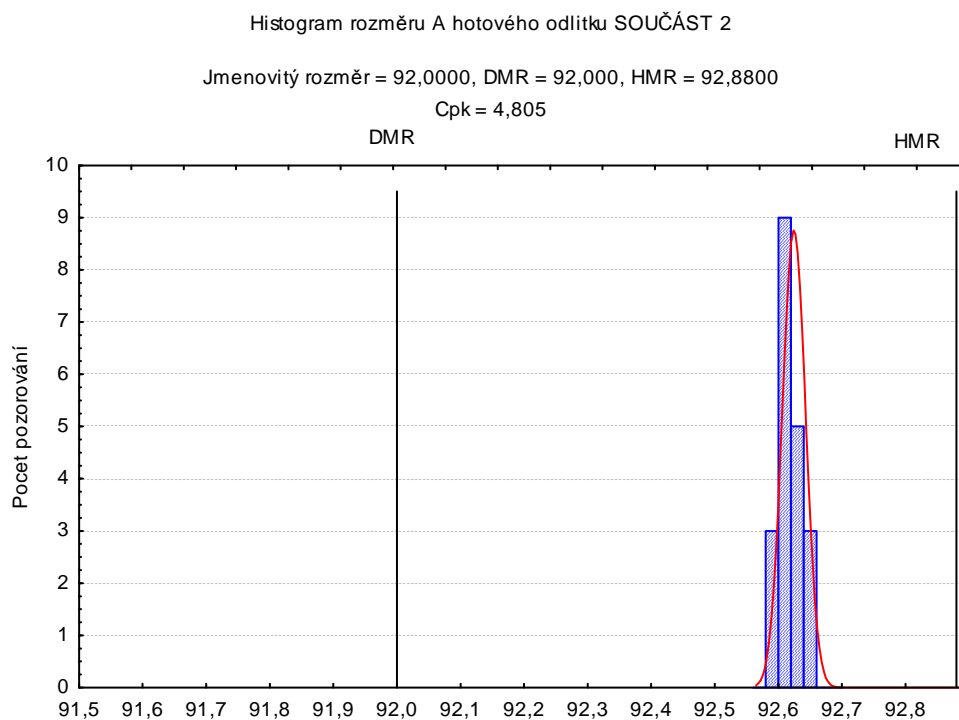
Při statistickém vyhodnocování byl každý soubor hodnot voskových modelů a odlitků SOUČÁST 2 testován na hrubou chybu Grubbsovým testem. V testovaných souborech hodnot nebyly zjištěny hrubé chyby. Hodnoty chování vosku a odlitků po otryskání byly zpracovány do následujících histogramů

1. Rozměr A



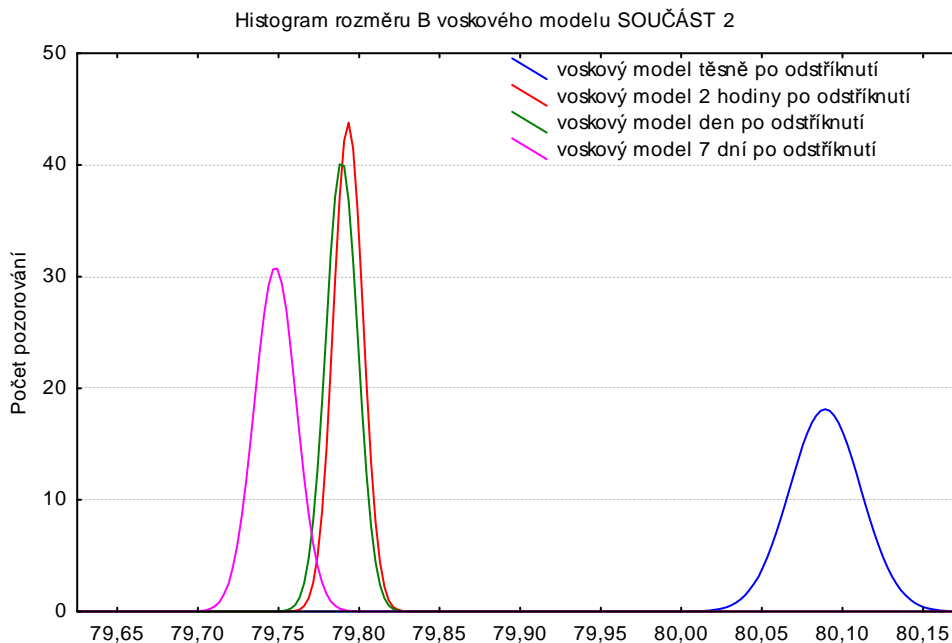
Obr. 2.27 Histogram rozměru A voskového modelu SOUČÁST 2

Na **obr. 2.27** je znázorněn histogram, který znázorňuje změnu rozměru A u voskového modelu SOUČÁST 2. Ze všech rozměrových fází plyne, že voskový model se pohybuje v užších mezích než voskový model po odstříknutí. Výsledné smrštění rozměru A voskového modelu SOUČÁST 2 je 0,252 % (0,3 mm)

**Obr. 2.28** Histogram rozměru A voskového modelu a odlitku SOUČÁST 2**Obr. 2.29** Histogram rozměru A hotového odlitku SOUČÁST 2

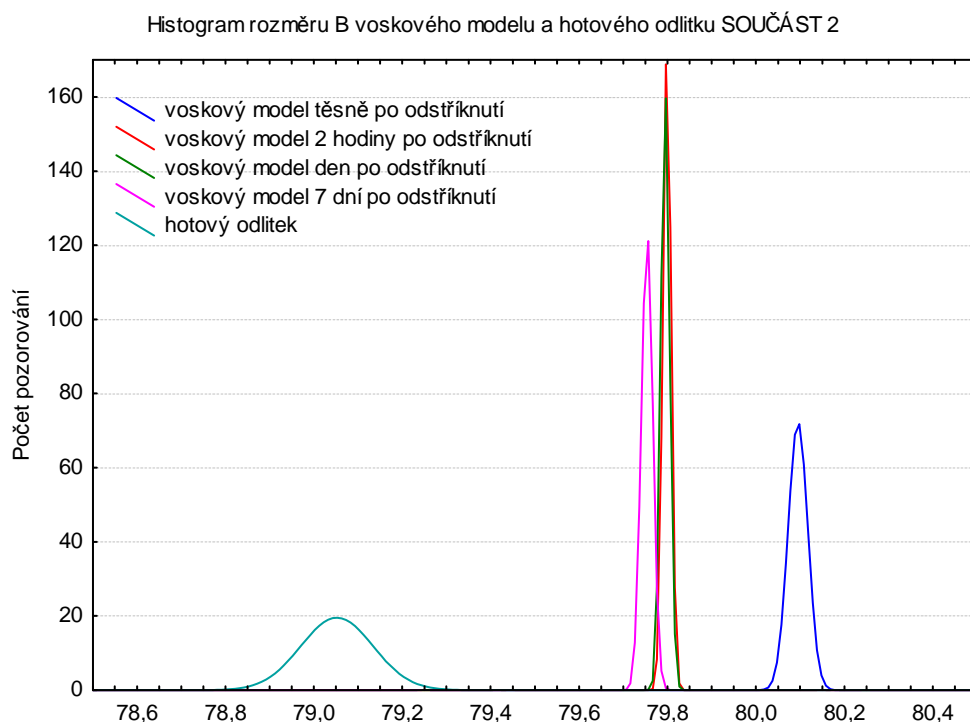
Změny rozměru A na odlitcích po otryskání jsou znázorněny na **obr. 2.29**. Z **obr. 2.29** plyne, že rozměr A odlitku SOUČÁST 1 se pohybuje v horní povolené toleranci a zároveň vyhovuje toleranci předepsané na výkrese.

2. Rozměr B

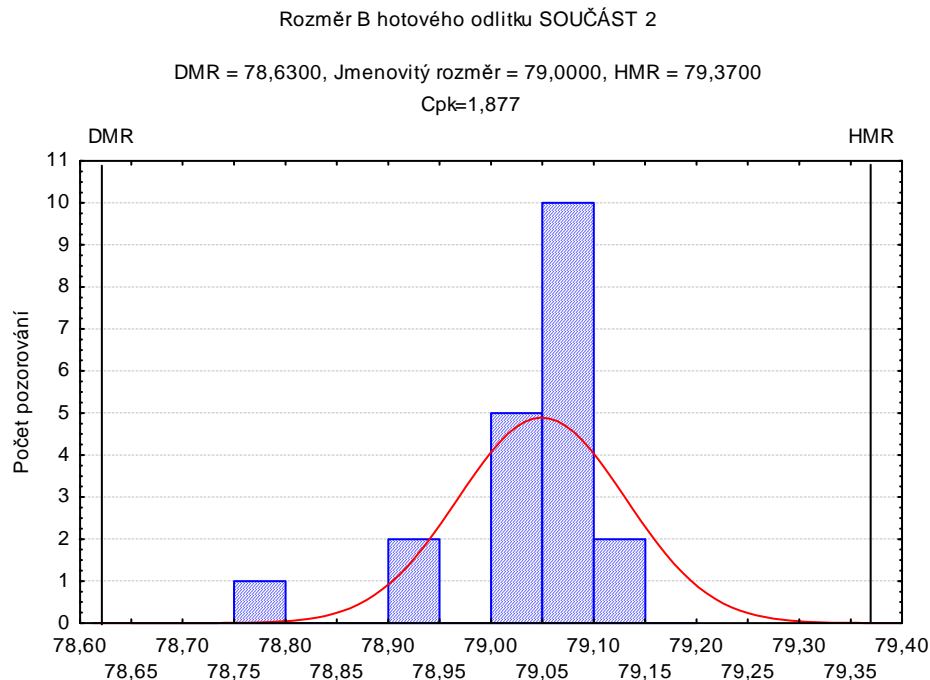


Obr. 2.30 Histogram rozměru B voskového modelu SOUČÁST 2

Uvedený histogram zobrazuje změnu rozměru B voskového modelu SOUČÁST 2. Z **obr. 2.30** plyne, že rozměr B ve všech měřených fázích se pohybuje v užších tolerancích jak předchozí rozměr. V průběhu časového období sedmi dnů se vosku model smrštil o hodnotu 0,527 % (tj. 0,42 mm).



Obr. 2.31 Histogram rozměru B voskového modelu a odlitku SOUČÁST 2

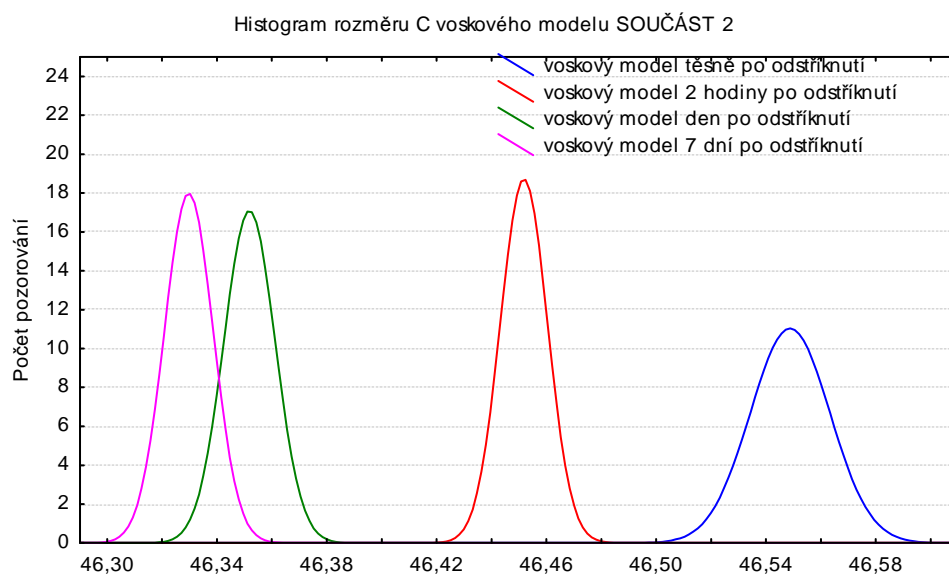


Obr. 2.32 Histogram rozměru B hotového odlitku SOUČÁST 2

Změny rozměru B u odlitků SOUČÁST 2 jsou zobrazeny na **obr. 2.32**. Z daného histogramu je zřejmé, že většina naměřených hodnot se pohybuje

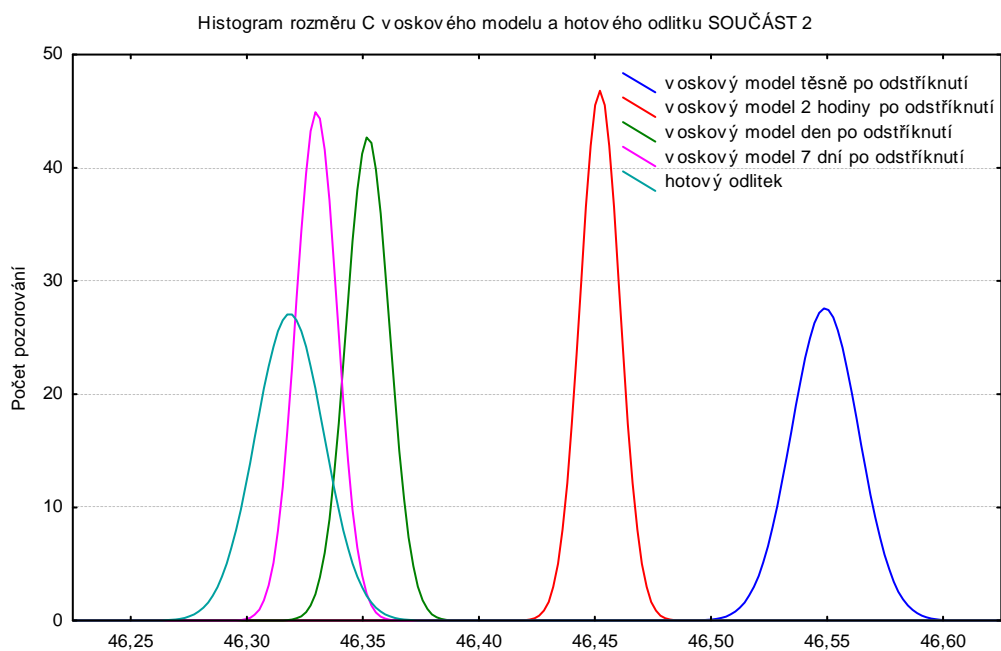
v blízkosti jmenovitého rozměru. U rozměru B je patrný velký rozptyl naměřených hodnot.

3. Rozměr C

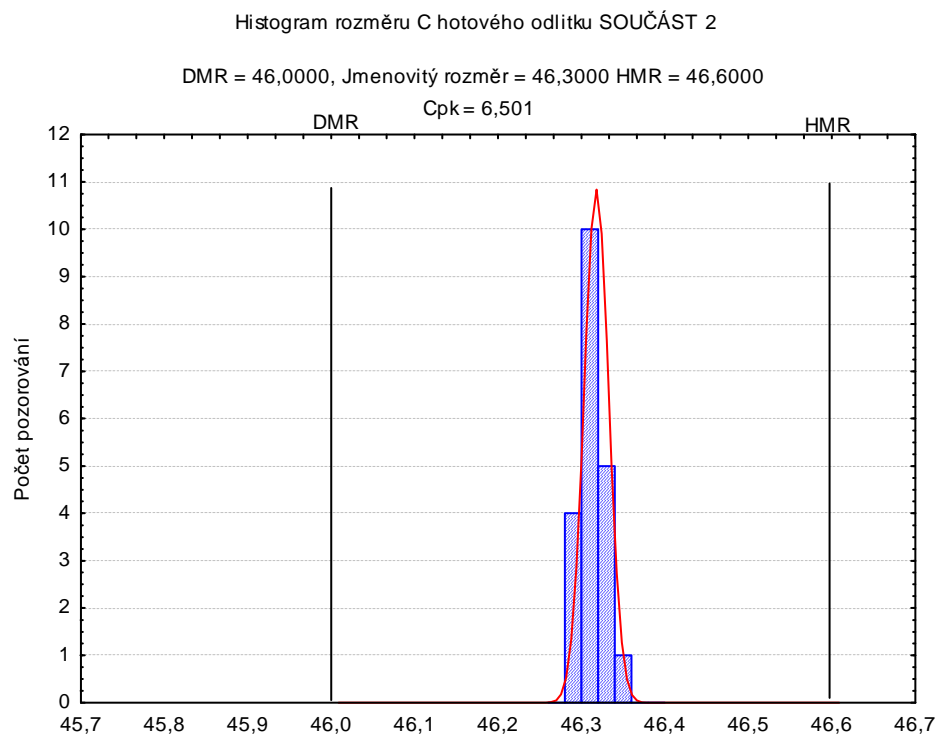


Obr. 2.33 Histogram rozměru C voskového modelu SOUČÁST 2

V průběhu sedmi dnů byly sledovány změny rozměru C na voskových modelech SOUČÁST 2. Tento rozměr je stabilní již po dvou hodinách po odstříknutí. Za stávající dobu se voskový model smrštil o hodnotu 0,708 % (0,33 mm).



Obr. 2.34 Histogram rozměru C voskového modelu a odlitku SOUČÁST 2



Obr. 2.35 Histogram rozměru C hotového odlitku SOUČÁST 2

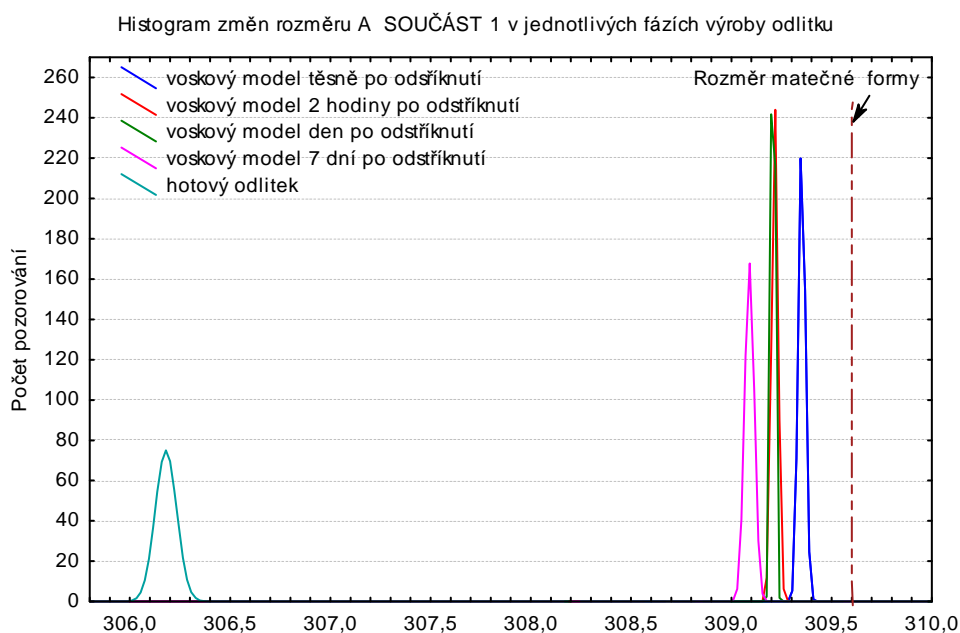
Uvedený histogram zobrazuje změnu rozměru C odlitku po otryskání. U všech naměřených rozměrů odlitků vykazuje rozměr maximální odchylku 0,05 mm od střední hodnoty. Dodržení rozměru, potažmo dodržení tolerance je tedy stoprocentní.

2.5 Shrnutí výsledků

Změny jednotlivých rozměrů v jednotlivých fázích výroby odlitku jsou znázorněny pomocí následujících histogramů.

SOUČÁST 1

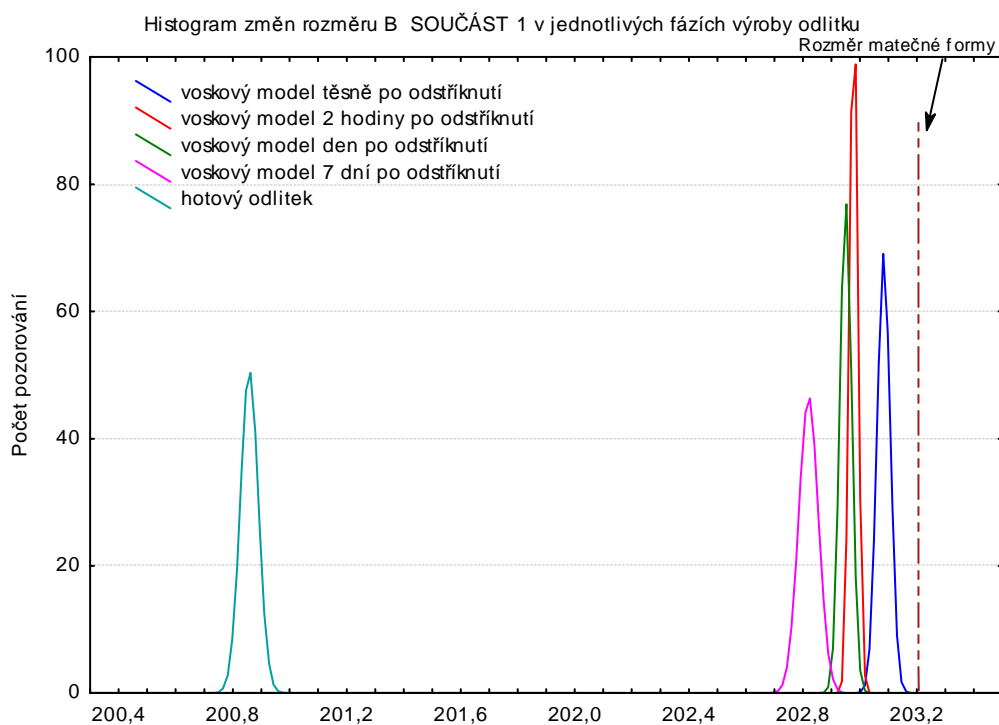
1. Rozměr A



Obr. 2.36 Histogram změn rozměru A SOUČÁST 1 v jednotlivých fázích výroby odlitku

V daném histogramu na **obr. 2.36** jsou zobrazeny změny rozměru A v jednotlivých fázích výroby odlitku. Naměřené rozměry voskových modelů těsně po odstříknutí jsou v rozmezí hodnot od 309,30 mm do 309,36 mm. Voskové modely 2 hodiny po odstříknutí se nacházejí v rozmezí hodnot od 309,18 mm do 309,22 mm a den po odstříknutí v rozpětí hodnot od 309,18 mm do 309,21 mm. Rozměry voskových modelů po sedmi dnech byly naměřeny v hodnotách od 309,06 mm do 309,12 mm. Hodnoty hotových odlitků se vyskytují v rozmezí od 306,06 mm do 306,27 mm. Odlitek se smrštil o hodnotu 0,937 % (tj. 2,89 mm) Rozměry A hotového odlitku vyhovují rozměru, který je předepsán na výkrese.

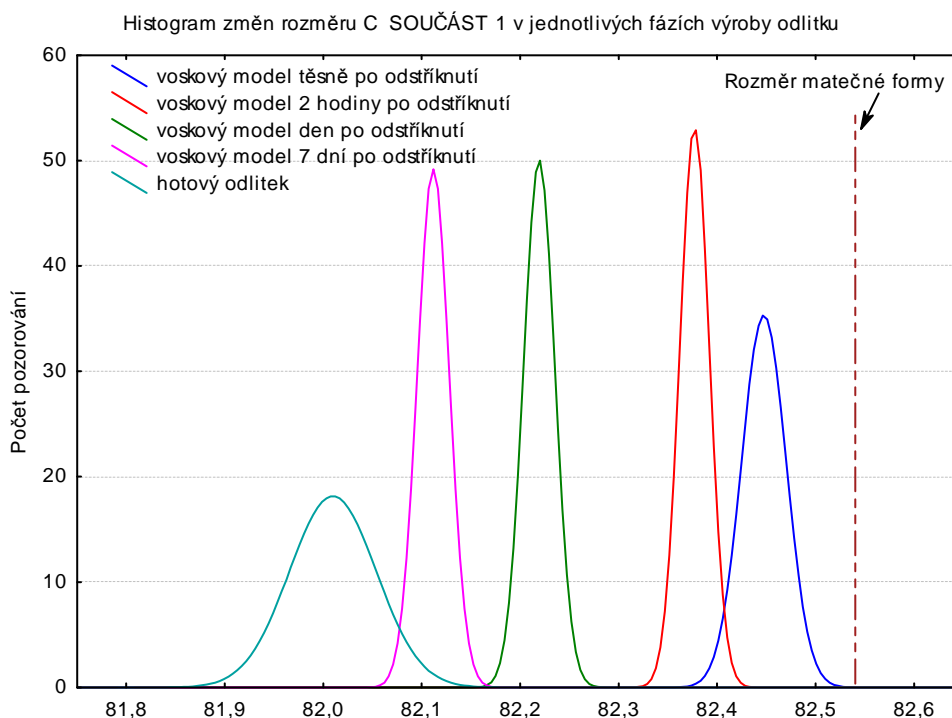
2. Rozměr B



Obr. 2.37 Histogram změn rozměru B SOUČÁST 1 v jednotlivých fázích výroby odlitku

Na **obr. 2.37** jsou znázorněny změny rozměru B SOUČÁST 1 v průběhu výroby odlitku. Voskové modely těsně po odstříknutí byly naměřeny v intervalu hodnot od 203,03 mm do 203,11 mm. Rozmezí hodnot voskových modelů 2 hodiny po odstříknutí se pohybuje od 202,95 mm do 202,98 mm. Voskové modely měřené den po odstříknutí se nacházejí v rozpětí hodnot od 202,90 mm do 202,96 mm a hodnoty voskové modely po 7 dnech se pohybují v širším intervalu hodnot od 202,77 mm do 202,86 mm. Rozměr B se po odlití smrští o hodnotu 0,962 % (tj. 1,95 mm), protože u tohoto rozměru se projevil vliv volného smrštění. Odlitky po odlití jsou v úzké rozpětí hodnot od 200,77 mm do 200,88 mm.

3. Rozměr C

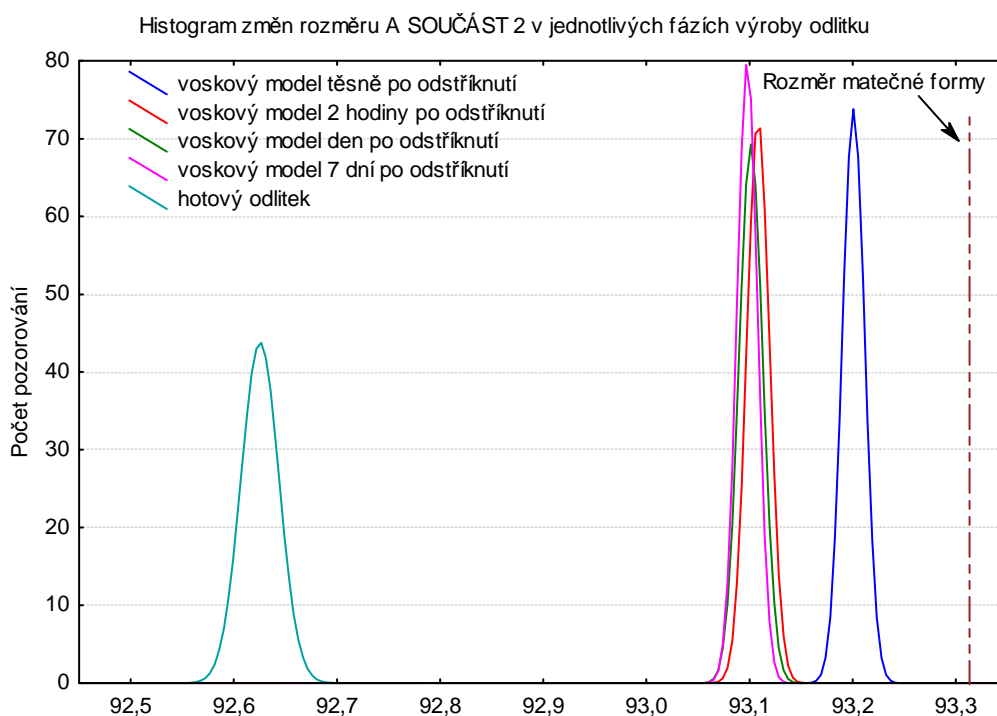


Obr. 2.38 Histogram změn rozměru C SOUČÁST 1 v jednotlivých fázích výroby odlitku

Při zjišťování změn rozměru C voskového modelu a odlitku SOUČÁST 1 jsou výsledky zobrazeny v histogramu na **obr. 2.38**. U tohoto rozměru se voskové modely těsně po odstříknutí pohybují v rozmezí hodnot od 82,42 mm do 82,48 mm a voskové modely měřené 2 hodiny po odstříknutí jsou v rozmezí hodnot od 81,94 mm do 82,06 mm. Voskové modely den po odstříknutí leží v rozpětí hodnot od 82,20 mm do 82,24 mm a voskové modely 7 dní po odstříknutí mají stejné rozpětí hodnot od 82,09 mm do 82,13 mm. V porovnání s předchozími rozměry odlitků vykazuje rozměr odlitku C menší smrštění z důvodu brzděného smršťování. Celkové smrštění odlitku rozměru C je 0,124 % (0,1mm).

SOUČÁST 2

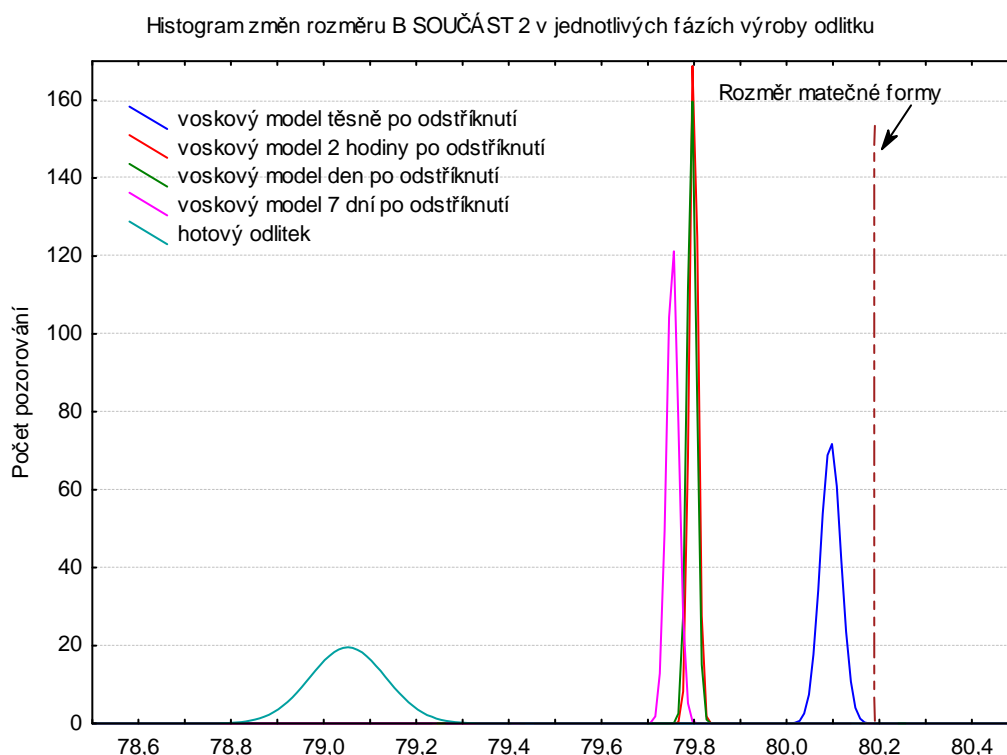
1. Rozměr A



Obr. 2.39 Histogram změn rozměru A SOUČÁST 2 v jednotlivých fázích výroby odlitku

Na **obr. 2.39** jsou znázorněny změny rozměru A SOUČÁST 2 v jednotlivých fázích výroby odlitku. V daném histogramu jsou rozměry voskových modelů po vyjmutí formy v rozmezí hodnot od 93,08 mm do 93,12 mm a hodnoty voskových modelů po 2 hodinách se nacházejí v rozmezí od 93,08 mm do 93,11 mm. Rozměry hodnot voskových modelů den po odstříknutí se pohybují v intervalu hodnot od 93,08 mm do 93,12 mm a voskové modely 7 dní leží ve stejném rozpětí hodnot od 93,08 mm do 93,11 mm. Voskové modely rozměru A jsou stabilní. Odlitek po odlití se smrštil o hodnotu 0,505 % (tj. 0,47 mm)

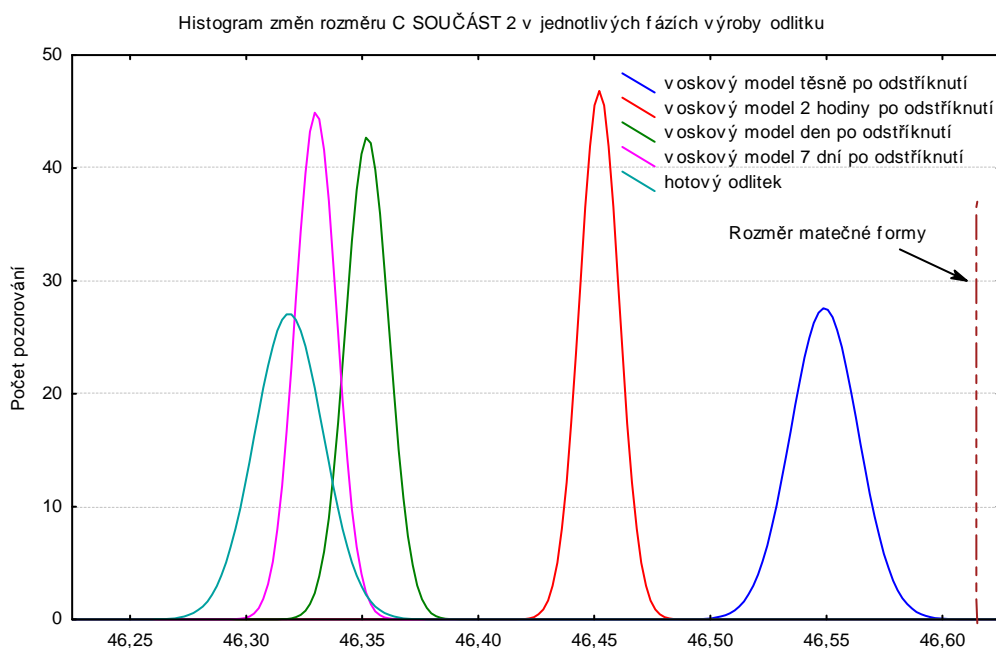
2. Rozměr B



Obr. 2.40 Histogram změn rozměru B SOUČÁST 2 v jednotlivých fázích výroby odlitku

Změny rozměru B na voskových modelech a odlitcích jsou znázorněny v histogramu na **obr. 2.40**. Z daného histogramu je vidět, že voskové modely těsně po odstříknutí mají rozpětí hodnot od 80,04 mm do 80,11 mm a voskové modely měřené 2 hodiny po odstříknutí leží ve stejném rozmezí hodnot od 80,04 mm do 80,11 mm. Voskové modely po 24 hodinách se pohybují v rozmezí hodnot od 79,77 mm do 79,81 mm a voskové modely po 7 dnech stabilizace se nacházejí v rozmezí hodnot od 79,73 mm do 79,77 mm. Naměřené hodnoty odlitku SOUČÁST 2 se vyskytují v intervalu od 78,79 mm do 79,11 mm. Celkové smrštění odlitku po odlití je 0,875 % (0,7 mm)

3. Rozměr C



Obr. 2.41 Histogram změn rozměru C SOUČÁST 2 v jednotlivých fázích výroby odlitku

Na **obr. 2.41** je uveden histogram změn rozměrů C SOUČÁST 2 v jednotlivých fázích výroby odlitku. Naměřené hodnoty voskových modelů po vyjmutí z formy se pohybují v rozmezí hodnot od 46,50 mm do 46,57 mm a voskové modely měřené po 2 hodinách leží v užším pásmu hodnot v rozmezí od 46,44 mm do 46,49 mm. Hodnoty rozměrů voskových modelů den po odstříknutí leží v rozmezí hodnot od 46,34 mm do 46,37 mm a voskové modely po stabilizaci sedmi dní mají hodnoty od 46,32 mm do 46,35 mm. Rozměr C odlitku se smrštil pouze o hodnotu 0,025 % z důvodu brzděného smrštění (tj. 0,01 mm).

2.6 Návrh dalších experimentů

Pro zajištění výroby rozměrově přesnějších silnostěnných voskových modelů, by bylo vhodné prodloužit stabilizaci voskových modelů na dobu čtrnácti dnů, protože voskové modely v průběhu sedmi dnů měření vykazují větší rozpětí hodnot rozměrů.

Dále by bylo vhodné zaměřit se na zjištění optimální teploty ve stabilizační místnosti v závislosti na stabilizaci voskových modelů.

ZÁVĚR

Metoda vytavitelného modelu je jednou z nejpřesnějších výrobních technologií. Stejně jako u této technologie jsou i v jiných odvětvích průmyslu kladeny největší požadavky na rozměrovou přesnost a jakost výrobku.

Ve slévárně Fimes a.s. se klade vysoký důraz na přesnost výroby odlitků. Technologii výroby se snaží upravit tak, aby proces výroby odlitků byl stabilnější s ohledem na rozměrovou přesnost. Pro zvýšení rozměrové stability se rozhodla firma Fimes a.s. pro výměnu stávajícího vosku za vosk, který je rozměrově stabilnější a má lepší mechanické a fyzikální vlastnosti.

Největší vliv na konečnou rozměrovou přesnost odlitků mají rozměry voskových modelů, které jsou závislé na přesnosti výroby matečné formy.

Při návrhu a výrobě matečné formy se bere v úvahu smršťování voskových modelů a samostatných odlitků v průběhu procesu. Proto se vždy u nových, nebo opravovaných forem vyrábí určité množství (10-20ks) zkušebních vzorků pro ověření rozměrů. Všechny rozměry jak voskových modelů, tak odlitků jsou pak změřeny a vyhodnoceny. Pokud některé konečné rozměry odlitku neodpovídají rozměrům, které jsou uvedeny na výkrese, následuje konzultace se zákazníkem, zda akceptuje takové rozměry, nebo zda uvolní tolerance těchto rozměrů. Pokud zákazník trvá na rozměrech výkresu je nutná úprava matečné formy. Po každé úpravě matečné formy se musí znovu opakovat měření a vyhodnocení. Toto se opakuje tak dlouho, než zákazník schválí vzorky a je možná sériová výroba.

Z výsledků měření je patrné, že u tenkostěnného voskového modelu se hodnoty rozměrů pohybují v užším rozpětí než u silnostěnného voskového modelu. Rozměry sledovaných odlitků leží v úzkém pásmu (tzn. nahodilé chyby používané technologie jsou přijatelné). Rozměry odlitku SOUČÁST 1 jsou posunuty k dolní a horní povolené toleranci, proto by bylo vhodné částečné „doladění“ matečné formy, která byla dodána zákazníkem. U rozměrů B a C odlitku SOUČÁST 1 se ukazuje mírná nestabilita procesu výroby.

Dosažené výsledky potvrzují fakt, že nejsložitějším problémem celé technologie lití metodou vytavitelného modelu z hlediska dosahované přesnosti odlitku je správné prvotní stanovení rozměrů matečné formy a také dosažení co největší stability procesu výroby odlitků.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] Horáček, M.: Rozměrová přesnost odlitků vyráběných metodou vytavitelného modelu, Habilitační práce, 2003, Brno
- [2] Suchomel, A.: Výroba přesných odlitků v České republice, Slévárenství, 1/2005, str. 3
- [3] Pavelka, M.: Užité vlastnosti lití vytavitelným modelem, Slévárenství, 10/2001, str. 581-584
- [4] Cileček, J.: přesné lití na prahu třetího tisíciletí, Slévárenství, 10/2001 str. 563
- [5] Doškář J. a kol.: Výroba přesných odlitků SNTL Praha 1976
- [6] HERMAN, Aleš.: Přesné lití na vytavitelný model, [online]. Praha: České vysoké učení, 2007-11-13; 16:18 [cit.2008-04-20; 18:15]. Dostupné na Internetu:
<<http://u12123.fsid.cvut.cz/podklady/MPL/presne%20liti%20na%20vytavitelny%20model.pdf>>
- [7] Mrázek, M.: Technologie přesného lití. Bulletin Sdružení přesného lití, 1999, str. 13-19
- [8] MORSON, Ben. The Investment casting process [online]. [cit.2008-06-20; 16:45]. Dostupné z: <<http://www.blaysen.com/process.php>>
- [9] Review of investment casting wax, Foundry Trade Journal, March 2004, Vol.178, No.3612, str. 82-86
- [10] Beeley, P.R. – Smart, R.F.: Investment castings. The Institute of materials, 1995
- [11] Matula, L.: Diplomová práce, VUT v Brně FS, 1999, Brno
- [12] Fiedler, H.: Wiederaufbereitung von Feingußwachsen, Giesserei 6/2002, str. 56-59
- [13] Helán, J.: Disertační práce, VUT v Brně FS, 1998, Brno
- [14] Rusín K a kol.: Slévárenské formovací materiály SNTL Praha 1991
- [15] Horáček, M., Michalčík, P., Wiedermann, J.: Rozměrové změny v průběhu technologie vytavitelného modelu, Slévárenství, 1/2005, str.7-18
- [16] Pracovní přepis pro přípravu a kontrolu modelové směsi, PP 132110, Fimes a.s.

- [17] Pracovní předpis pro odstříknutí voskového modelu, PP 132101, Fimes a.s.
- [18] Pracovní předpis pro rozebírání forem, PP 132101, Fimes a.s.
- [19] Pracovní předpis pro hrotování voskových modelů, PP 132104, Fimes a.s.
- [20] Pracovní předpis pro páření voskových modelů a sestavení vtokových soustav, PP 132105, Fimes a.s.
- [21] Pracovní předpis obalování stromečků, PP 132200, Fimes a.s.
- [22] Pracovní předpis pro vytavování a vyplachování skořepiny, PP 132300, Fimes a.s.
- [23] Pracovní předpis pro zakládání a žíhání skořepinových forem, PP 132400, Fimes a.s.
- [24] Pracovní předpis pro tavení a odlévání Al odlitků, PP 132502. Fimes a.s.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

\bar{x}	[mm]	aritmetický průměr
x_i	[-]	naměřené hodnoty
n	[-]	počet hodnot
s^2	[-]	rozptyl výběrového souboru
σ^2	[-]	rozptyl základního souboru
σ	[-]	směrodatná odchylka
HMR	[mm]	horní mezní rozměr voskového modelu
DMR	[mm]	dolní mezní rozměr voskového modelu